



Carla Sofia Gonçalves Néri **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos sob
Influência de Sistemas Geotérmicos**



**Carla Sofia Gonçalves
Néri**

**Estudo do Comportamento Mecânico de Solos sob
Influência de Sistemas Geotérmicos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Mestre José Alberto Marques Lapa, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dissertação elaborada no âmbito do projeto SUCCEsS - Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais. Estudos aplicados a climas do sul da Europa, PTDC/ECM-GEO/0728/2014, com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia/MCTES

À minha família.

"No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade"
Albert Einstein

o júri

Presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora associada da Universidade de Aveiro

Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira
Investigadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (arguente)

Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador).

agradecimentos

Mais uma etapa da minha vida a acabar e com isto queria agradecer de uma maneira muito especial a todas as pessoas que de uma maneira ou de outra contribuíram para o meu sucesso e me ajudaram nesta fase final.

Começo por agradecer ao meu orientador o Prof. Doutor Joaquim Macedo por toda a ajuda disponibilizada, toda a sua dedicação, paciência e sabedoria demonstradas ao longo do ano.

Aos meus coorientadores Prof. Doutor José Claudino Cardoso e o Prof. Mestre José Lapa pela sabedoria transmitida e pelas importantes sugestões manifestadas ao longo do ano.

À Engenheira Maria Carlos e ao Senhor Vítor por toda ajuda em laboratório e toda a disponibilidade demonstrada.

Ao meu irmão Rui e à minha cunhada Ana por todo o apoio nesta etapa da minha vida, por toda a sua preciosa ajuda e por todos os sábios conselhos transmitidos, foram uma ajuda valiosa.

Ao meu irmão Paulo, à minha cunhada São e aos meus sobrinhos pelo apoio e por estarem sempre presentes a ajudar em qualquer situação.

A todos os meus amigos pela capacidade que têm em me aturar, pelo apoio e pelos momentos inesquecíveis que levo para a vida, em especial à Mónica Manuel e à Raquel Matos que me aturaram em muitos trabalhos de grupo, e à Laura Laranjo e Márcia Neves por me aturarem em casa.

Por último, agradecer em especial aos meus pais, pelo esforço que tiveram para que eu pudesse concluir esta fase importante da minha vida, sem eles nada disto seria possível e a eles devo tudo.

Obrigada a todos do fundo do coração!

palavras-chave

corte direto; sistemas geotérmicos; caracterização física; caracterização mecânica; solos.

resumo

As energias renováveis são fontes inesgotáveis de energia obtidas da natureza que nos rodeia, como a energia solar, a energia eólica ou a energia geotérmica. Esta última fonte tem vindo a ser cada vez mais utilizada através da implantação de sistemas geotérmicos no solo, os designados sistemas geotérmicos superficiais, que permitem trocas de calor entre o sistema e o solo e transportar esse calor para o interior das habitações para aquecimento e arrefecimento das mesmas.

A presente dissertação teve como principal objetivo o estudo do comportamento dos solos, designadamente o comportamento mecânico, quando estes estão sujeitos a mudanças de temperatura da ordem das provocadas por sistemas geotérmicos superficiais.

A influência que estes sistemas têm ou poderão ter nos solos é ainda um assunto em estudo e é, pois, importante conhecê-la de modo a verificar se a temperatura transmitida por estes sistemas terá alguma ação no solo.

Esta dissertação está enquadrada num caso de estudo real, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, realizado no campus da Universidade de Aveiro e tem como objetivo o estudo da influência dos sistemas geotérmicos quando aplicados nos solos ou em estacas. Para este estudo foram realizados furos de ensaio onde foram aplicados os sistemas e retiradas as amostras de solo para analisar.

Foram ainda realizados no âmbito da dissertação ensaios de caracterização física e mecânica de solo, nomeadamente ensaios de corte direto, realizados em dois solos distintos recolhidos em dois dos furos efetuados. Efetuaram-se simultaneamente ensaios de corte direto a uma areia padrão para comparação de resultados.

Finalmente, procedeu-se à análise paramétrica dos resultados obtidos para validação e verificação dos mesmos, tendo em vista trabalhos e estudos futuros.

Da análise realizada concluiu-se que a temperatura tem efeito no solo é influenciada pela percentagem de finos existente no solo, isto é, aparentemente o estudo indicou que quanto mais percentagem de finos mais alterações se verificam na resistência ao corte. Devido a limitação de amostras e de ensaios é de grande importância a realização de mais estudos e ensaios para corroborar os resultados obtidos.

keywords

Direct shear; geothermal systems; physical characterization; mechanical characterization; soils.

abstract

Renewable energies are endless sources of energy obtained from the nature that surrounds us, such as solar energy, wind energy or geothermal energy. This latter source has been increasingly used by the implantation of geothermal systems in the soil, called surface geothermal systems that allow heat exchanges between the system and the soil and to transport this heat to the interior of the houses for heating and cooling of the same ones.

The main objective of this dissertation was the study of the comportment of soils, namely mechanics behavior, when they are subject to changes in temperature caused by surface geothermal systems.

The influence that these systems have or may have on soils is still a subject under study and it is therefore important to know it in order to verify if the temperature transmitted by these systems will have some action in the soil.

This dissertation is framed in a real case study, funded by the Foundation for Science and Technology, held at the University of Aveiro and aims to study the influence of geothermal systems when applied to soils or pilling. For this study, were realized test holes where the systems were applied and the soil samples were removed for analysis.

Physical and mechanical soil characterization tests were also carried out, namely direct shear tests, performed in two different soils collected at two of the holes made. Direct shear tests were also performed on standard sand for results correlation.

Finally, parametric analysis of the results obtained were proceeded for validation and verification of the same, with a view to future works and studies.

From the analysis was concluded that the temperature has effect on the soil is influenced by the percentage of clay in the soil, that is, apparently the study indicated that the more percentage of clay the more changes occur in the shear strength. Due to the limitation of samples and tests it is of great importance to carry out further studies and tests to corroborate the results obtained.

Índice

Índice	xv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xix
Índice de Gráficos	xxi
Simbologia.....	xxv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Organização da dissertação	2
2. Interação Sistema Geotérmico – Solo	4
2.1. Caracterização dos sistemas geotérmicos.....	4
2.2. Caracterização Física dos Solos	6
2.3. Caracterização Mecânica dos Solos	7
2.3.1. Ensaio de corte direto sob efeito de temperatura.....	7
2.3.2. Ensaio triaxial	8
2.4. Caracterização Térmica de Solos	9
3. Metodologia.....	15
3.1. Caracterização Física.....	16
3.1.1. Limite de liquidez (wL).....	22
3.1.2. Limite de plasticidade (wP).....	24
3.2. Caracterização Mecânica.....	24
4. Resultados.....	27
4.1. Caracterização Física.....	27
4.2. Caracterização Mecânica.....	35
4.2.1. Resultados do ensaio padrão da areia	35
4.2.2. Resultados furo 16:.....	44
4.2.3. Resultados furo 17:.....	52
5. Conclusões e Perspetivas Futuras.....	61
5.1. Conclusões.....	61
5.2. Perspetivas futuras	63
Referências bibliográficas	65
ANEXO 1	68
ANEXO 2	71
ANEXO 3	83

Índice de Figuras

Figura 1. Sistemas geotérmicos: a) Sistema geotérmico fechado horizontal; b) Sistema geotérmico fechado vertical; c) Sistema geotérmico aberto.....	5
Figura 2. Sonda geotérmica em profundidade.....	6
Figura 3. Ensaio de corte direto.....	7
Figura 4. Esquema ensaio triaxial.....	9
Figura 5. Esquema de dispositivo GHP.....	11
Figura 6. Esquema do dispositivo HFMA.....	11
Figura 7. Esquema do dispositivo de <i>Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique</i>	12
Figura 8. Esquema do dispositivo <i>Hot Wire Method</i>	12
Figura 9. Esquema do dispositivo <i>Transient Plane Source</i>	13
Figura 10. Edifício CCCI, ainda em construção.....	16
Figura 11. Planta dos furos geotérmicos efetuados no terreno.....	16
Figura 12. Exemplo das amostras furo 16.	17
Figura 13. Exemplo das amostras furo 17.	17
Figura 14. Exemplo pesagem para determinação do teor humidade, furo 16.	18
Figura 15. Exemplo método do picnómetro, furo 16.	19
Figura 16. Lavagem solo, furo 17.	20
Figura 17. Método da peneiração.	21
Figura 18. Concha Casagrande, furo 16.	22
Figura 19. Penetrómetro, furo 16.	22
Figura 20. Equipamentos para determinar o limite de liquidez (método de Casagrande).....	23
Figura 21. Equipamento para determinar o limite de liquidez (método do <i>fall-cone test</i>)......	23
Figura 22. Exemplo ensaio plasticidade, furo 16.	24
Figura 23. Aparato experimental do ensaio corte direto com introdução de temperatura.....	26

Índice de Tabelas

Tabela 1. Características físicas dos solos do furo 16, dos 0 aos 60 metros.	28
Tabela 2. Características físicas dos solos do furo 16, dos 60 aos 132 metros.	29
Tabela 3. Características físicas dos solos do furo 17, dos 0 aos 60 metros.	32
Tabela 4. Características físicas dos solos do furo 17, dos 60 aos 132 metros.	33
Tabela 5. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (areia padrão).	38
Tabela 6. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 20°C (areia padrão).	40
Tabela 7. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (areia padrão).	42
Tabela 8. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (areia padrão).	43
Tabela 9. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (solo do furo 16).	46
Tabela 10. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 20°C (solo do furo 16).	48
Tabela 11. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (solo do furo 16).	50
Tabela 12. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (solo do furo 16).	51
Tabela 13. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (solo do furo 17).	54
Tabela 14. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 20°C (solo do furo 17).	56
Tabela 15. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (solo do furo 17).	58
Tabela 16. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (solo do furo 17).	59

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Distribuição dos limites de Atterberg ao longo do furo 16.	30
Gráfico 2. Distribuição da densidade das partículas sólidas ao longo do furo 16.	30
Gráfico 3. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros.	31
Gráfico 4. Distribuição dos limites de Atterberg ao longo do furo 17.	34
Gráfico 5. Distribuição da densidade das partículas sólidas ao longo do furo 17.	34
Gráfico 6. Distribuição granulométrica da amostra dos 96m aos 102 metros.	35
Gráfico 7. Distribuição granulométrica da amostra de areia.	36
Gráfico 8. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (areia padrão).	37
Gráfico 9. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 10°C (areia padrão).	37
Gráfico 10. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (areia padrão).	38
Gráfico 11. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (areia padrão). ..	39
Gráfico 12. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 20°C (areia padrão).	39
Gráfico 13. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (areia padrão).	40
Gráfico 14. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C (areia padrão). ..	41
Gráfico 15. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 40°C (areia padrão).	41
Gráfico 16. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C (areia padrão).	42
Gráfico 17. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (areia padrão).	43
Gráfico 18. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros, antes e após o ensaio de corte direto.	44
Gráfico 19. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (solo do furo 16).	45
Gráfico 20. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 10°C (solo do furo 16).	45
Gráfico 21. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (solo do furo 16).	46
Gráfico 22. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (solo do furo 16).	47
Gráfico 23. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 20°C (solo do furo 16).	47
Gráfico 24. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (solo do furo 16).	48
Gráfico 25. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C (solo do furo 16).	49
Gráfico 26. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 40°C (solo do furo 16).	49
Gráfico 27. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C.	50
Gráfico 28. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (solo do furo 16).	51
Gráfico 29. Distribuição granulométrica da amostra dos 96 aos 102 metros, antes e após o ensaio de corte direto.	52
Gráfico 30. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (solo do furo 17).	53
Gráfico 31. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 10°C (solo do furo 17).	53
Gráfico 32. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 10°C (solo do furo 17).	54

Gráfico 33. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (solo do furo 17).	55
Gráfico 34. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 20°C (solo do furo 17).	55
Gráfico 35. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 20°C (solo do furo 17).	56
Gráfico 36. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C (solo do furo 17).	57
Gráfico 37. Gráfico deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical a 40°C (solo do furo 17).	57
Gráfico 38. Gráfico tensão normal <i>versus</i> tensão de corte a 40°C (solo do furo 17).	58
Gráfico 39. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (solo do furo 17).	59
Gráfico 40. Distribuição granulométrica da amostra dos 120 aos 126 metros (sem lavagem).	72
Gráfico 41. Distribuição granulométrica da amostra dos 108 aos 114 metros (sem lavagem).	72
Gráfico 42. Distribuição granulométrica da amostra dos 0 aos 6 metros.	73
Gráfico 43. Distribuição granulométrica da amostra dos 6 aos 12 metros.	73
Gráfico 44. Distribuição granulométrica da amostra dos 12 aos 18 metros.	74
Gráfico 45. Distribuição granulométrica da amostra dos 18 aos 24 metros.	74
Gráfico 46. Distribuição granulométrica da amostra dos 24 aos 30 metros.	75
Gráfico 47. Distribuição granulométrica da amostra dos 30 aos 36 metros.	75
Gráfico 48. Distribuição granulométrica da amostra dos 36 aos 42 metros.	76
Gráfico 49. Distribuição granulométrica da amostra dos 42 aos 48 metros.	76
Gráfico 50. Distribuição granulométrica da amostra dos 48 aos 54 metros.	77
Gráfico 51. Distribuição granulométrica da amostra dos 54 aos 60 metros.	77
Gráfico 52. Distribuição granulométrica da amostra dos 60 aos 66 metros.	78
Gráfico 53. Distribuição granulométrica da amostra dos 66 aos 72 metros.	78
Gráfico 54. Distribuição granulométrica da amostra dos 72 aos 78 metros.	79
Gráfico 55. Distribuição granulométrica da amostra dos 84 aos 90 metros.	79
Gráfico 56. Distribuição granulométrica da amostra dos 90 aos 96 metros.	80
Gráfico 57. Distribuição granulométrica da amostra dos 96 aos 102 metros.	80
Gráfico 58. Distribuição granulométrica da amostra dos 102 aos 108 metros.	81
Gráfico 59. Distribuição granulométrica da amostra dos 114 aos 120 metros.	81
Gráfico 60. Distribuição granulométrica da amostra dos 126 aos 132 metros.	82
Gráfico 61. Distribuição granulométrica da amostra dos 0 aos 6 metros.	84
Gráfico 62. Distribuição granulométrica da amostra dos 6 aos 12 metros.	84
Gráfico 63. Distribuição granulométrica da amostra dos 12 aos 18 metros.	85
Gráfico 64. Distribuição granulométrica da amostra dos 18 aos 24 metros.	85
Gráfico 65. Distribuição granulométrica da amostra dos 24 aos 30 metros.	86
Gráfico 66. Distribuição granulométrica da amostra dos 30 aos 36 metros.	86
Gráfico 67. Distribuição granulométrica da amostra dos 36 aos 42 metros.	87
Gráfico 68. Distribuição granulométrica da amostra dos 42 aos 48 metros.	87
Gráfico 69. Distribuição granulométrica da amostra dos 48 aos 54 metros.	88
Gráfico 70. Distribuição granulométrica da amostra dos 54 aos 60 metros.	88
Gráfico 71. Distribuição granulométrica da amostra dos 60 aos 66 metros.	89
Gráfico 72. Distribuição granulométrica da amostra dos 66 aos 72 metros.	89
Gráfico 73. Distribuição granulométrica da amostra dos 72 aos 78 metros.	90
Gráfico 74. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros.	90
Gráfico 75. Distribuição granulométrica da amostra dos 84 aos 90 metros.	91
Gráfico 76. Distribuição granulométrica da amostra dos 90 aos 96 metros.	91
Gráfico 77. Distribuição granulométrica da amostra dos 102 aos 108 metros.	92
Gráfico 78. Distribuição granulométrica da amostra dos 108 aos 114 metros.	92

Gráfico 79. Distribuição granulométrica da amostra dos 114 aos 120 metros.....	93
Gráfico 80. Distribuição granulométrica da amostra dos 120 aos 126 metros.....	93
Gráfico 81. Distribuição granulométrica da amostra dos 126 aos 132 metros.....	94

Simbologia

FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia

GSHP - *Ground Source Heat Pump*

GHP - *Guarded Hot Plate*

HFMA - *Heat Flow Meter Apparatus*

HWM - *Hot Wire Method*

BHE - *Borehole Heat Exchanges*

GCHP - *Ground Coupled Heat Pump*

GWHP - *Ground Water Heat Pump*

SWHP - *Surface Water Heat Pump*

CCCI - Complexo das Ciências de Comunicação e Imagem

CICFANO - Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas Aplicadas à Nanotecnologia e à Oceanografia

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Durante os últimos anos tem havido uma crescente utilização das energias renováveis. Estes tipos de energia são provenientes de recursos naturais que estão em constante renovação, ou seja, nunca se esgotam. A inclusão destes tipos de energia em edifícios tem como objetivo conceber edifícios eficientes, é, pois, necessário permitir a integração de sistemas que captem a energia e a transforme em energia útil para o edifício. Existem vários tipos de sistemas que permitem captar a energia fornecida através dos recursos naturais e transformá-la não só em energia para o edifício, mas também para a sua climatização. Entre os quais, painéis solares térmicos e fotovoltaicos e sistemas geotérmicos. Este último tem vindo a ser cada vez mais utilizado.

Esta dissertação tem por base o estudo do comportamento mecânico de solos quando instalados sistemas geotérmicos no mesmo. Os sistemas geotérmicos aproveitam a estabilidade térmica do solo do calor armazenado na parte superficial da crosta terrestre, para aquecer e/ou arrefecer os edifícios. Neste caso o potencial geotérmico do solo é utilizado como permutador de calor para climatização de edifícios utilizando bombas de calor. A explicação do funcionamento dos sistemas geotérmicos é apresentada na secção 2.1.

As aplicações geotérmicas superficiais podem ser utilizadas para aquecer ou arrefecer todo o tipo de edificações, tanto moradias unifamiliares como grandes edifícios. A forma mais utilizada para instalação deste tipo de fonte de energia é através de um sistema de climatização radiante especialmente em pavimentos ou lajes de betão. Estes sistemas têm a vantagem de serem mais eficientes e mais fáceis de instalar, permitem também uma maior eficiência da bomba de calor o que reduz o consumo de energia e consequentemente o custo. Esta energia tem também a vantagem de estar sempre disponível e de reduzir a emissão de gases com efeito estufa.

Com isto, é importante perceber qual a influência que estas trocas de calor entre o solo e o edificado vão influenciar a sua resistência mecânica. Com este objetivo foi realizada no decurso desta tese uma série de ensaios de corte direto em que se procedeu ao aquecimento da água presente na caixa de corte. Todo este processo será explicado na subsecção 2.3.1.

1.2.Motivação

Um sistema geotérmico superficial utiliza o calor disponível nos depósitos superficiais da crosta terrestre e transporta-o para fornecer aquecimento ou arrefecimento as habitações e edifícios em geral. Como é um recurso natural é importante saber como o podemos utilizar para benefício do ser humano sem que implique poluição ou destruição de recursos naturais. Para a utilização dos recursos naturais é necessária uma investigação aprofundada de todas as características e de que forma a sua utilização tem impactos no nosso planeta.

A utilização destes sistemas é recente, pelo que carece de estudos sobre a sua influência nas características dos solos, como nos potenciais impactos nas fundações e nas infraestruturas nele instaladas. Sendo assim, é importante compreender como as ações térmicas provocadas pela exploração do sistema geotérmico influenciam o comportamento do solo, em aspetos como a sua resistência mecânica, o seu comportamento tensão-deformação, o desenvolvimento de pressões intersticiais, entre outros.

1.3.Objetivos

O principal objetivo desta dissertação foi analisar se o fluxo de energia que é transferido pelo sistema geotérmico do edifício para o solo e a consequente alteração de temperatura produz alguma alteração na sua resistência mecânica. Para isso, foram realizados ensaios de corte direto em amostras de solo obtidas no campus da Universidade de Aveiro, em que a água presente na caixa de corte foi submetida a 3 temperaturas diferentes de modo a simular as temperaturas a que o solo estará em diferentes fases da operação do sistema. Antes da realização dos ensaios de caracterização mecânica foram realizados ensaios de caracterização física para determinar todas as propriedades do solo.

1.4.Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos.

O primeiro capítulo corresponde à introdução onde se faz o enquadramento do tema da dissertação e se apresenta a motivação e os principais objetivos a atingir com o estudo.

O segundo capítulo corresponde à revisão da literatura e é onde se descreve todo o processo mais detalhadamente do trabalho desenvolvido ao longo do ano bem como a apresentação do edifício em estudo e de todos os ensaios realizados para a caracterização do solo.

No terceiro capítulo encontra-se a metodologia realizada ao longo do segundo semestre de todos os ensaios efetuados.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos tanto da caracterização física como da caracterização mecânica.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões finais e finalmente as perspectivas futuras, ou seja, os desenvolvimentos futuros para o presente trabalho.

2. INTERAÇÃO SISTEMA GEOTÉRMICO – SOLO

Neste capítulo serão apresentados os vários tipos de sistemas geotérmicos superficiais existentes e respetivo funcionamento, bem como as grandezas físicas determinadas nos solos e referidos os ensaios de resistência mecânica mais correntes, detalhando o tipo de ensaio realizado nesta dissertação. Faz-se também referência a alguns dos tipos de ensaios de caracterização térmica de solos existente apesar de não se ter efetuado nenhum destes ensaios, servindo apenas como referência para trabalhos futuros.

2.1. Caracterização dos sistemas geotérmicos

Os sistemas geotérmicos superficiais utilizam o calor armazenado na superfície da terra para aquecer ou arrefecer os edifícios e esta troca de calor é processada através de bombas de calor implementadas no edifício de modo a ampliar os valores alcançados na permuta, Powrie e Preene (2009). Os sistemas geotérmicos superficiais podem atingir profundidades de até 150 metros e o calor é retirado através de bombas de calor geotérmico (*Ground Source Heat Pump* – GSHP) e são por isso chamados de sistemas geotérmicos de baixa entalpia, ou seja, a temperatura do fluido utilizado na permuta (neste caso a água) é inferior a 150°C. No caso de climatização de edifícios em que a temperatura do solo requerida é inferior a 30°C pode-se classificar estes sistemas como de Muito Baixa Entalpia. No caso de aproveitamentos geotérmicos baseados em temperatura da água do solo existem 3 tipos de bombas de calor, os GCHP (*Ground Coupled Heat Pump*) que são acoplados ao solo, os GWHP (*Ground Water Heat Pump*) que utilizam água dos aquíferos e os SWHP (*Surface Water Heat Pump*) que utilizam água superficial. Estes sistemas de bombas de calor podem ser fechados ou abertos. No caso presente a água utilizada para a permuta de temperatura não é água do solo, mas sim água que percorre tubagens de pequeno diâmetro, inseridos em fundações (estacas ou outros elementos enterrados) ou em furos geotérmicos e que efetuam a permuta com o solo num sistema primário de aquisição térmica e com a massa estrutural do edifício (normalmente lajes de betão) num sistema secundário de distribuição térmica. Dado que se pretende que as trocas térmicas funcionem em aquecimento ou arrefecimento, as bombas de calor geotérmicas são reversíveis.

Estes sistemas com bombas de calor podem ser fechados ou abertos. Nos sistemas abertos são necessários furos de bombagem e injeção, enquanto nos sistemas fechados

utilizam água a circular em circuito fechado como forma de transportar o calor. Estes sistemas atuam como uma fonte de aumento de temperatura em modo de aquecimento e como um dissipador energético em modo de arrefecimento.

Existem vários tipos de sistemas geotérmicos fechados entre os quais: furos permutadores de calor (BHE - *Borehole Heat Exchanges*), estruturas termoativas, estacas termoativas, paredes moldadas termoativas, túneis com permutadores de calor e loops horizontais. Os sistemas fechados também podem ser classificados em dois tipos, verticais e horizontais. O sistema mais utilizado, devido a forte rendimento e fiabilidade é a captação geotérmica vertical, pois o fluido percorre um maior percurso para ganhar calor e também porque a temperatura tende para um valor constante com a profundidade do furo, sendo assim são mais viáveis que os sistemas horizontais. Este sistema utiliza sondas geotérmicas para recolher o calor, dentro da sonda para um líquido que geralmente é água.

De seguida, apresentam-se na Figura 1 os vários tipos e modos de funcionamento de sistemas geotérmicos superficiais.

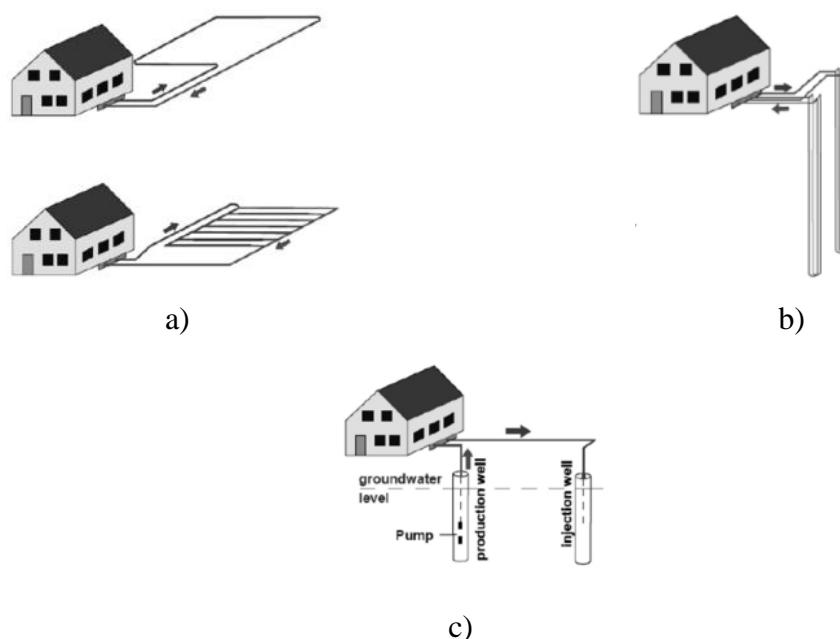


Figura 1. Sistemas geotérmicos: a) Sistema geotérmico fechado horizontal; b) Sistema geotérmico fechado vertical; c) Sistema geotérmico aberto. (fonte: http://www.hybridearth.pt/main/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=2)

As sondas geotérmicas podem atingir profundidades de até 150 metros. São constituídas por um ou dois tubos em plástico de grande durabilidade e com boas propriedades de condução de calor e são instaladas no solo em profundidade. Estas também contêm uma tampa no tubo

para proteção de saída da sonda, um tubo em polietileno reticulado para ligação aos coletores e uma sonda em U para transporte de um fluido que absorve ou dissipa a temperatura. De seguida, apresenta-se um exemplo de uma sonda geotérmica em profundidade, Figura 2.

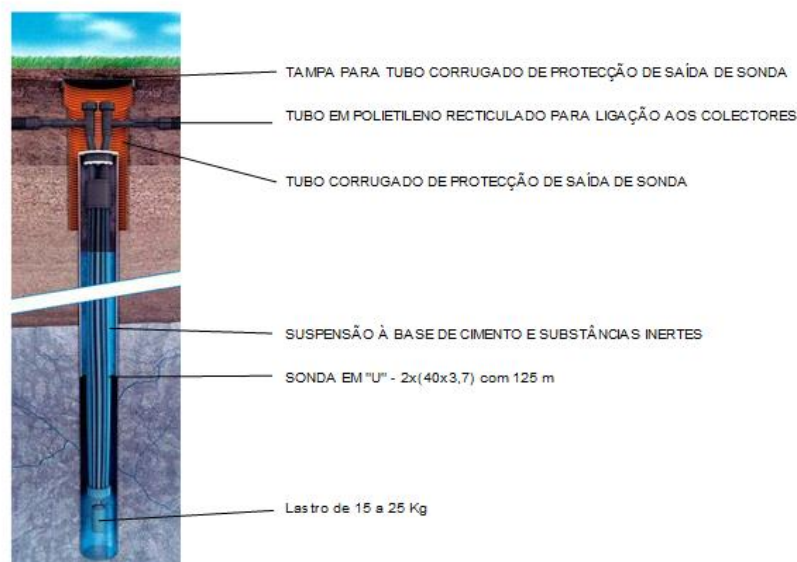


Figura 2. Sonda geotérmica em profundidade. (fonte: http://www.hybridearth.pt/main/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=2)

2.2.Caracterização Física dos Solos

Uma parte importante deste trabalho será a determinação das propriedades físicas das amostras de solo estudadas, a fim de se aferir a influência destas características no seu comportamento térmico. A caracterização física de um solo é feita através da quantificação de determinados parâmetros (as designadas propriedades índice): teor em água, peso volúmico, peso volúmico das partículas (densidade), índice de vazios e a porosidade. Algumas destas grandezas relacionam-se entre si, como por exemplo, quanto maior for o índice de vazios maior será a porosidade e vice-versa.

A obtenção destes parâmetros faz-se recorrendo à realização de ensaios de laboratório às amostras obtidas *in situ*. A determinação do teor em água realiza-se efetuando uma secagem em estufa, com base na norma ISO/TS 17892-1; para o peso volúmico é necessário retirar amostras de solo com um extrator de amostras (norma ISO/TS 17892-2), e para o peso volúmico das partículas ou a sua densidade utiliza-se o método do picnómetro, descrito na norma ISO/TS 17892-3. Após a realização destes ensaios faz-se a classificação do solo através da Classificação Unificada, segundo a norma ASTM D 2487-85. Em Anexo 1 encontra-se a tabela de classificação dos solos.

É importante conhecer as características físicas do solo para podermos conhecer os tipos de solo com que estamos a trabalhar e assim de poder fazer comparações de resultados quando estes têm características semelhantes.

2.3.Caracterização Mecânica dos Solos

Um dos aspetos determinantes para a caracterização mecânica do solo é a sua resistência ao corte. Esta caracterização é feita, geralmente através de, ensaios de corte direto e de ensaios triaxiais. Neste caso, os ensaios realizados foram somente os de corte direto.

2.3.1. Ensaio de corte direto sob efeito de temperatura

Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência do solo ao corte direto (ângulo de atrito interno e coesão) ao longo de uma superfície de corte imposta. O ensaio consiste em colocar uma amostra de solo numa secção quadrangular numa caixa cortada horizontalmente. É aplicada nesta amostra uma força normal, N , na parte superior da amostra, após isto, é aplicada uma translação horizontal na parte inferior da amostra, com velocidade constante, e a parte superior mantém-se fixa devida a uma reação, T . Na Figura 3 é possível verificar o funcionamento do ensaio de corte direto.

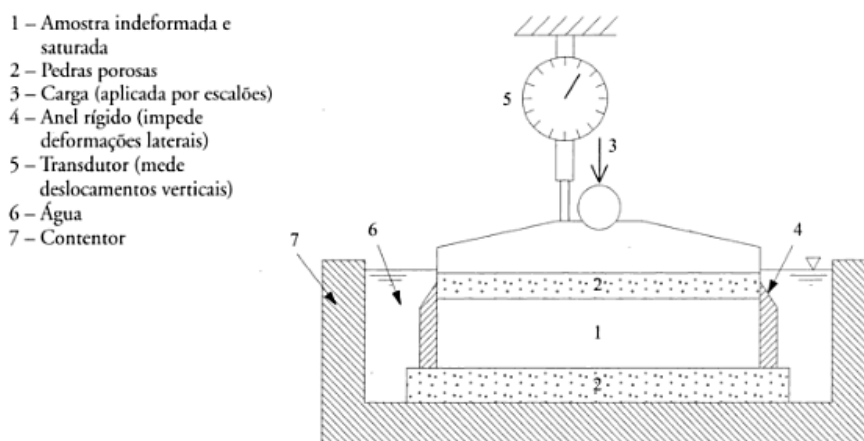


Figura 3. Ensaio de corte direto. (Matos Fernandes, 2011)

Este ensaio tem algumas limitações, tais como: não é possível controlar a drenagem da amostra e assim não permite controlar nem medir a tensão horizontal e a pressão neutra, especialmente em solos argilosos; só é possível conhecer a tensão no plano de corte da amostra e o estado de deformação no plano de corte não é uniforme ao longo do ensaio.

Sendo assim, este ensaio tem vindo cada vez mais a ser substituído pelo ensaio triaxial, por ser um ensaio com resultados mais fiáveis.

No ensaio realizado neste estudo foi implementada uma mudança que consistiu em colocar a água presente na amostra a diferentes temperaturas. Todo o processo está descrito detalhadamente mais à frente neste documento na parte da metodologia da caracterização mecânica.

2.3.2. Ensaio triaxial

O ensaio triaxial, Figura 4, é um tipo de ensaio utilizado para medir as propriedades mecânicas dos solos: resistência ao corte e comportamento tensões-deformações.

Este ensaio consiste em colocar uma amostra de solo, normalmente de forma cilíndrica, numa célula de média a alta pressão e confinada por um fluido, normalmente utiliza-se água. É aplicada uma pressão na água através de uma fonte externa. A amostra de solo encontra-se protegida por uma membrana de borracha flexível para não deixar a água penetrar na amostra e alterar a sua constituição. Na tampa da célula de pressão encontra-se um êmbolo para fornecer uma força na amostra. São também colocadas duas pedras porosas na amostra, uma em cima e outra por baixo da mesma, para permitir a drenagem da amostra e a medição da pressão na água (pressão intersticial), u . A força provocada pelo êmbolo é aumentada continuamente ou em intervalos de tempo até atingir um valor máximo, ou até o solo romper e se verificar uma grande deformação vertical.

O registo das pressões e deformações ao longo do ensaio, em condições de drenagem impedida ou permitida, possibilitam a obtenção de muita informação referente ao comportamento da amostra de solo ensaiada.

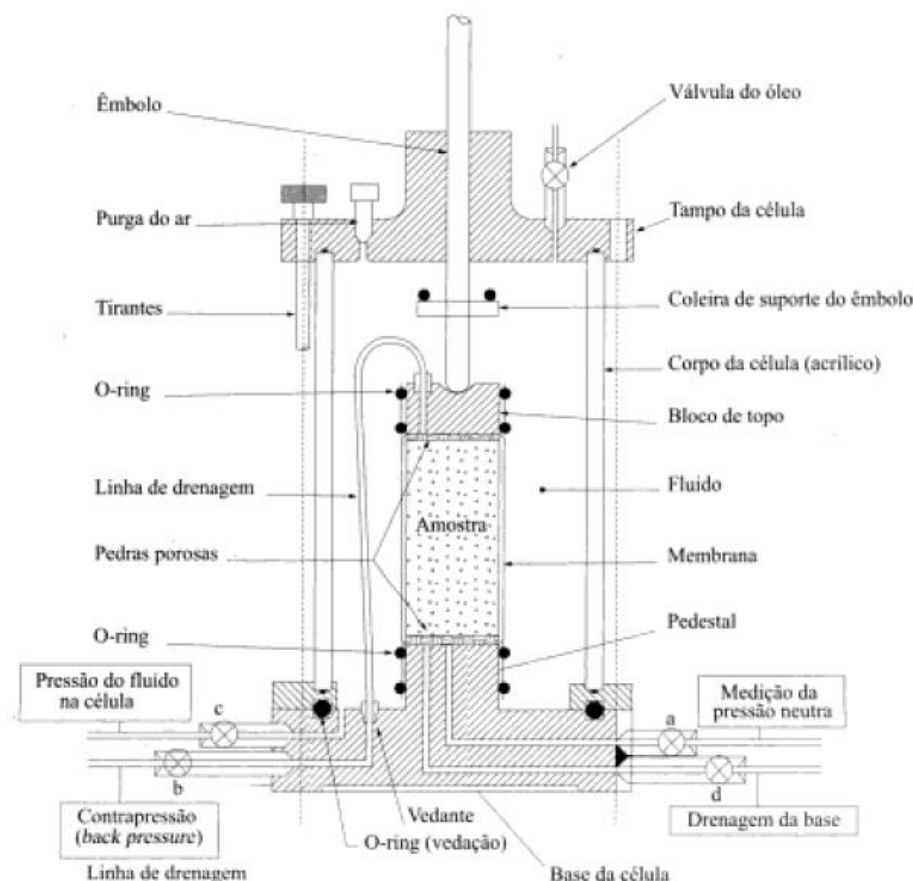


Figura 4. Esquema ensaio triaxial. (adaptado de Matos Fernandes, 2011)

2.4.Caracterização Térmica de Solos

Nesta dissertação não foi efetuado nenhum estudo relativo às propriedades térmicas do solo, mas faz-se referência aos vários tipos de ensaios pois é um tema que está diretamente ligado ao tema desta tese.

A transmissão de calor no solo dá-se através de três processos: por condução, convecção ou radiação. O processo mais significativo para a transmissão de calor no solo e em geoestruturas termoativas é por condução pois neste existe um contacto direto das partículas da matéria.

O tema da caracterização térmica do solo é um tema relativamente pouco estudado, e sendo praticamente inexistentes estudos deste tipo para os solos portugueses, daí a relevância deste estudo e a sua importância para o futuro da utilização das energias renováveis. Nesta temática é importante referir o conceito de fadiga térmica do solo. Este conceito baseia-se no facto de o solo receber uma quantidade tal de calor que chegará a um ponto em que este não conseguirá dissipar mais calor e, se isto acontecer, o sistema geotérmico poderá deixar de funcionar, não se tornando viável a sua utilização. Para que não ocorra o fenómeno de fadiga

térmica é importante, em primeiro lugar, que as sondas geotérmicas ou as estacas termoativadas sejam instaladas com distância suficiente entre si para que o solo ao redor da sonda não influencie a sonda mais próxima e o mesmo acontece para as estacas.

Outras propriedades físicas de extrema importância são a condutividade térmica do solo, o calor específico e a densidade. A condutividade térmica é o fator de proporcionalidade que relaciona a taxa à qual o calor é transferido por condução com o gradiente de temperatura, depende do grau de saturação (teor em água) e da porosidade, entre outros fatores, daí a importância da caracterização física do solo numa primeira fase do trabalho. A capacidade térmica (ou calor específico), define a quantidade de energia armazenada num material por unidade de massa por unidade de variação da temperatura. Resumindo, o calor específico reflete a capacidade que o solo tem para atuar como um reservatório de calor enquanto a condutividade térmica é a capacidade que o solo tem de transmitir esse calor.

Para se proceder à caracterização térmica dos solos recorre-se a ensaios de laboratório. Estes ensaios estão divididos em dois tipos, ensaios em regime estacionário e ensaios em regime variável. Existem três tipos de ensaios em regime estacionário que podem ser realizados: o ensaio de Placa Quente Protegida (GHP), o ensaio de Aparelho Fluxiométrico de Calor (HFMA) e o ensaio de *Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*.

O ensaio GHP, Figura 5, é constituído por uma unidade de medição onde está inserida uma placa de aquecimento, duas placas de arrefecimento e proteções que possibilitam a aquisição do fluxo de calor unidirecional. As proteções podem ser primárias ou secundárias. As primeiras são sempre parte integrante do dispositivo e são colocadas em redor da unidade de medição, separada desta por um espaço preenchido por ar. A proteção secundária nem sempre é necessária, sendo apenas utilizada para ensaios em que a temperatura exceda em 10°C a temperatura ambiente, segundo a ASTM C177-10 (2010).

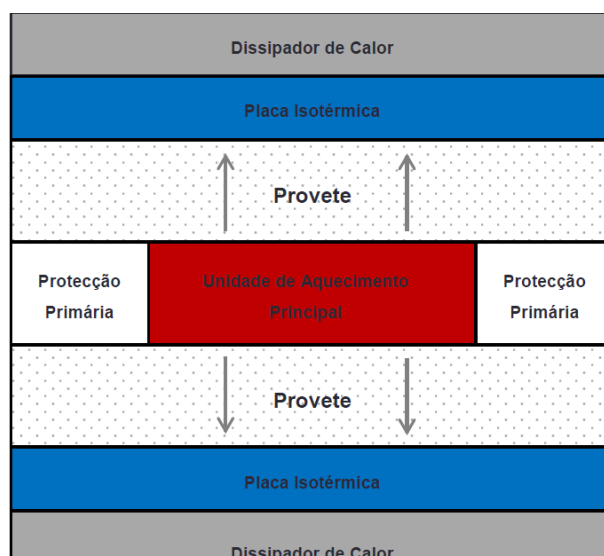


Figura 5. Esquema de dispositivo GHP. (Adaptado de: ASTM C177-10 (2010))

O ensaio de Aparelho Fluximétrico de Calor (HFMA), Figura 6, é também, um dispositivo para medição da condutividade térmica de diversos materiais, através da adição de um fluxo de calor estacionário. Este ensaio baseia-se num conceito relativamente simples, de rápida execução e com um grande campo de aplicação e por esses motivos é utilizado com grande frequência em diversos materiais, segundo a ASTM C518-10 (2010).

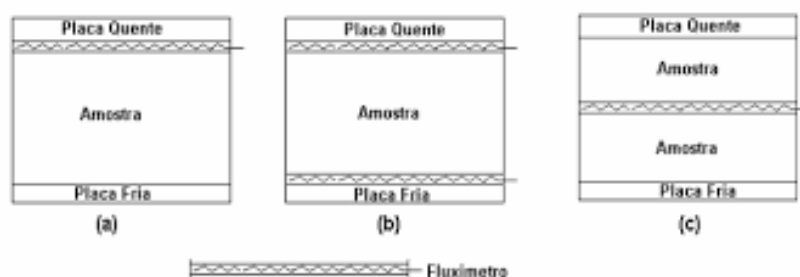


Figura 6. Esquema do dispositivo HFMA. (Adaptado de: ASTM C518-10 (2010))

O último ensaio realizado em regime estacionário é o ensaio *Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*, Figura 7, e através deste ensaio é possível determinar a condutividade térmica de diversos materiais entre $0,2$ e $200 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ e com temperaturas de ensaio entre 90K e 1300K .

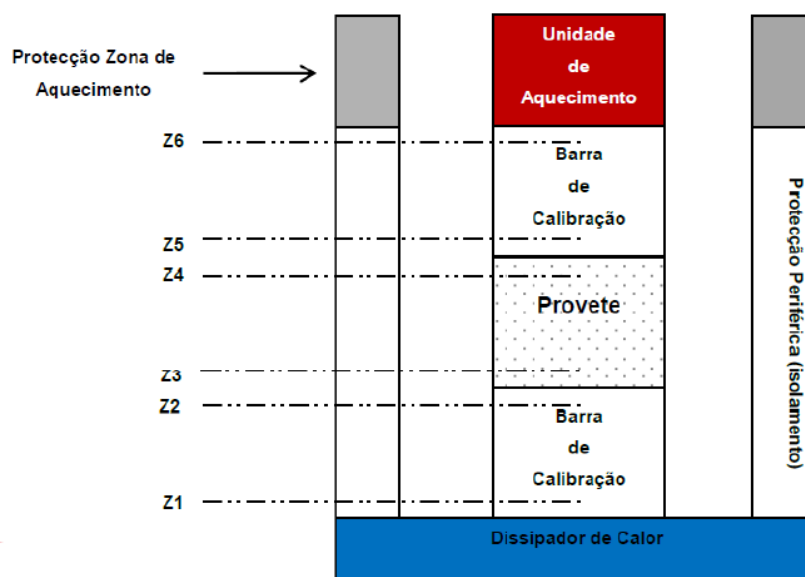


Figura 7. Esquema do dispositivo de *Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*. (Adaptado de: ASTM E1225-09 (2009))

No que diz respeito aos ensaios em regime variável existem também três tipos de ensaios: o *Hot Wire Method*, Sondas Térmicas e o *Transient Plane Source*. Estes ensaios permitem também determinar a condutividade térmica do solo, mas em estado de transição, ou seja, determinam a condutividade enquanto a temperatura do solo varia devida a um aquecimento ou arrefecimento do mesmo.

O primeiro método, *Hot Wire Method*, Figura 8, é baseado no *Line Source Model*, que considera uma fonte de calor infinitamente extensa que, ao aquecer, esse calor é transmitido ao solo originando assim um fluxo radial de energia térmica. Através deste método é possível obter a condutividade térmica, tanto de materiais granulares como de outro tipo de materiais sólidos, líquidos e gases.

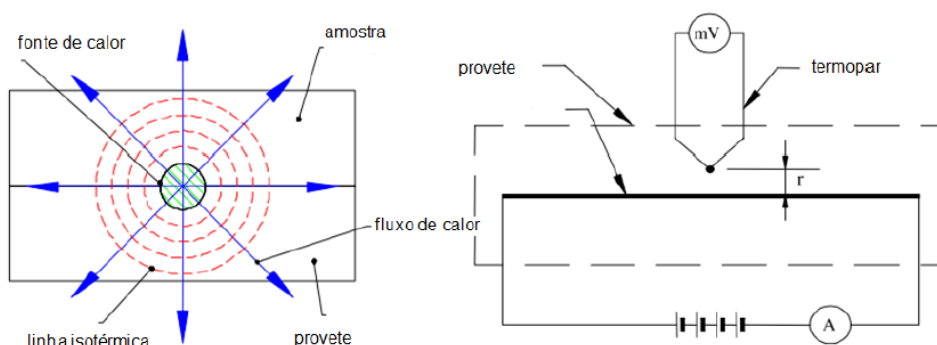


Figura 8. Esquema do dispositivo *Hot Wire Method*. (Adaptado de: Franco (2007))

O segundo método, método das Sondas Térmicas, é um caso particular do método do HWM e tem como objetivo medir a taxa de variação de temperatura da fonte de calor quando esta é

sujeita a aquecimento ou arrefecimento. Este método pressupõe que a fonte de energia térmica é infinita e assim, a condutividade térmica é determinada com recurso à monitorização da dissipação de calor na agulha térmica. O ensaio com recurso a sondas térmicas é mais utilizado quando se pretende analisar sedimentos não consolidados ou em rochas. A sua fiabilidade está associada ao contacto entre a agulha e o solo, ou seja, quanto maior o contacto existente entre a agulha e o solo, obter-se-ão melhores resultados, devendo-se evitar a existência de ar entre a agulha e o solo (ASTM D5334-05 (2005)). O aquecimento do solo deve ser efetuado durante pelo menos 1000 segundos e a uma potência constante de valor conhecido e devem ser realizadas medições a cada 5 segundos até ao primeiro minuto de duração do ensaio e posteriormente em intervalos de 30 segundos. Após os 1000 segundos a fonte de calor deve ser desligada, desde que a variação de temperatura entre duas medições consecutivas não exceda os 10 K.

Por último, o ensaio do *Transient Plane Source*, Figura 9, é também um ensaio utilizado para determinar a condutividade térmica, contudo, apenas em materiais sólidos.

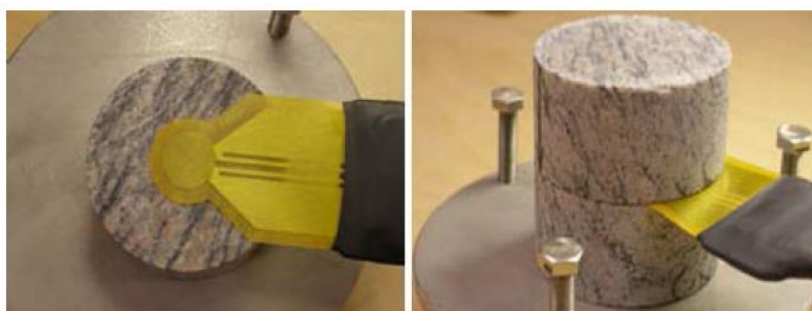


Figura 9. Esquema do dispositivo *Transient Plane Source*. (fonte: http://www.sp.se/en/index/resources/firetechnology/equipment/tps_brk/sidor/default.aspx)

Através de pesquisas efetuadas foi possível verificar que o tema da caracterização térmica de solos é um tema muito pouco estudado em todo o mundo. Cada vez mais este tem sido um tema de grande relevância e interesse em ser estudado pois, é uma fonte de energia renovável e uma mais-valia para o futuro do planeta.

Foram realizadas pesquisas à cerca do assunto da caracterização térmica de solos e algumas das principais conclusões que os autores indicados obtiveram, os resultados são apresentados de seguida.

Low et al. (2015) utilizaram os mesmos ensaios para a caracterização térmica do solo, ensaios em regime variável e em regime transitório para a observação das grandezas que influenciam na condutividade térmica do solo. A conclusão observada foi que os parâmetros são o tipo de solo, a densidade, a composição mineralógica e o tamanho das partículas.

Barry-Macaulay et al. (2013) utilizaram o método da sonda da agulha térmica com o objetivo de determinar quais os parâmetros do solo influenciados pela temperatura, ou seja, a condutividade térmica do solo, e concluíram que esta varia com a humidade do solo, a densidade, a composição mineralógica e o tamanho das partículas.

Fricke (1992) concluíram que a condutividade térmica do solo é significativamente influenciada pela sua saturação e pela densidade seca das partículas.

Pender (2009) utilizando o método da sonda da agulha térmica, concluíram que a condutividade térmica do solo aumentava com o aumento da sua densidade e com a diminuição da porosidade.

Chen (2008), analisou a condutividade térmica em areias e a conclusão chegada foi a mesma, esta aumenta com a diminuição da porosidade e com o aumento da saturação.

Numa outra perspetiva mais relacionada com a capacidade de transferência de calor numa estaca termoativa, Lopes (2014), concluiu que um aumento da amplitude térmica da ação provoca um aumento na quantidade de energia transferida e o mesmo acontece com o diâmetro da estaca, ou seja, ao aumentar o diâmetro possibilita uma maior quantidade de energia transferida. Por fim, concluiu também que o grau de saturação também condiciona o calor total transferido, ou seja, quanto mais saturado o solo mais calor é transferido.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia adotada nos ensaios, quer de caracterização física quer de caracterização mecânica. Todos os ensaios foram rigorosamente realizados segundo as normas, respeitando todos os processos e etapas de cada ensaio.

Esta dissertação está enquadrada num projeto de investigação científica financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), que engloba três instituições de estudo e investigação em Portugal e que tem como objeto de estudo dois edifícios do Campus de Santiago da Universidade de Aveiro dotados de um sistema geotérmico para sua climatização, nomeadamente o edifício do Complexo das Ciências de Comunicação e Imagem (CCCI), Figura 10, o Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas Aplicadas à Nanotecnologia e à Oceanografia (CICFANO). Este estudo implicou uma análise do comportamento do sistema geotérmico, mas mais importante ainda, o comportamento do solo aquando do funcionamento do mesmo.

O estudo empreendido teve por base os solos de fundação do edifício CCCI, onde foram realizadas duas sondagens com recolha de amostras. As características físicas foram analisadas em diversas amostras de solo extraídas ao longo dos 2 furos e em relação às características mecânicas apenas foram analisadas em duas 2 amostras, uma de cada furo. Os ensaios das características físicas efetuados foram os comumente executados e estes irão ser referenciados *à posteriori* nesta dissertação. No que concerne aos ensaios mecânicos, foram realizados ensaios de corte direto, nos quais a água na caixa de corte durante o ensaio foi submetida a 3 temperaturas diferentes para analisar a sua influência na sua resistência mecânica e consequentemente influenciar a viabilidade do sistema. Todos estes processos serão descritos detalhadamente mais à frente.



Figura 10. Edifício CCCI, ainda em construção.

3.1.Caracterização Física

A caracterização física dos solos do edifício em estudo (CCCI) consistiu na análise do teor em água, da determinação da densidade real das partículas sólidas, da granulometria incluindo a caracterização do material mais fino através do *Sedigraph*, e da determinação dos limites de Atterberg. As amostras de solo para a execução dos ensaios foram retiradas dos furos 16 (Figura 12) e 17 (Figura 13), e encontram-se representados na Figura 11. Estas amostras foram recolhidas através de trado e são amostras remexidas.

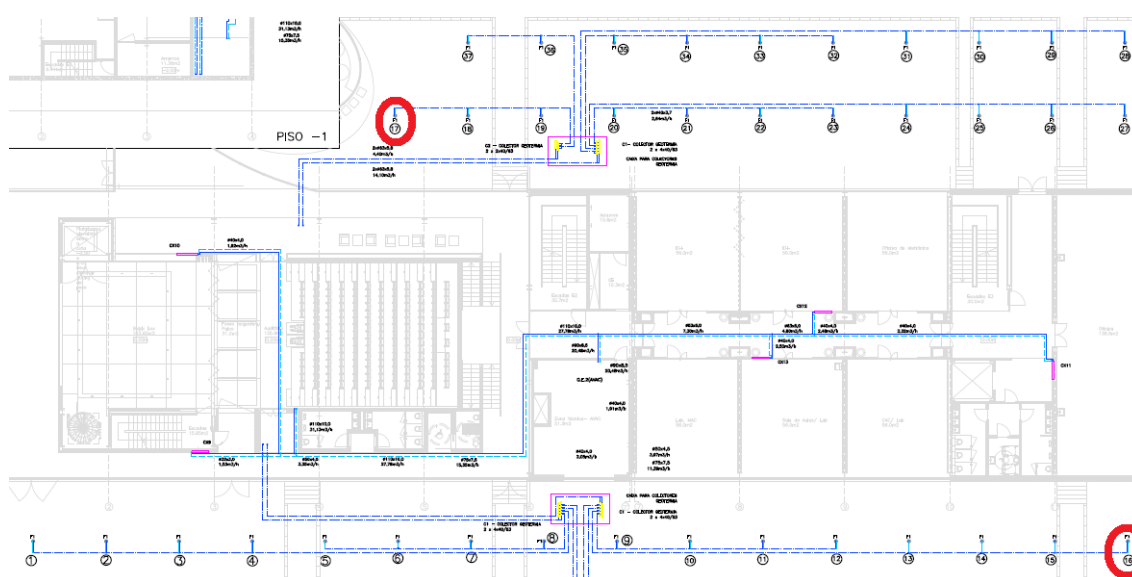


Figura 11. Planta dos furos geotérmicos efetuados no terreno.

A caracterização física de um solo é feita através da quantificação de determinados parâmetros: teor em água, peso volúmico, peso volúmico das partículas (densidade), índice de vazios e a porosidade.



Figura 12. Exemplo das amostras furo 16.



Figura 13. Exemplo das amostras furo 17.

O método de secagem em estufa para a determinação do teor em água consiste em determinar o peso húmido da amostra a analisar, de seguida coloca-se a amostra em estufa para secagem

e depois de seca volta-se a pesar a amostra. Sendo assim, o teor em água foi calculado pesando a amostra húmida (Figura 14), de seguida foi seca em estufa a 100°C e por fim, pesou-se a amostra seca. A diferença entre o peso da amostra húmida e o peso da amostra seca dá-nos o teor em água da amostra, ver equação (1). É importante salientar que as amostras encontravam-se numa câmara com humidade e temperatura controladas há alguns meses, portanto, o teor em água real da amostra poderá variar dos parâmetros calculados em laboratório.

$$w = \frac{(RV + \text{Amostra húmida}) - (RV + \text{Amostra seca})}{(\text{Amostra húmida})} \times 100 (\%) \quad (1)$$

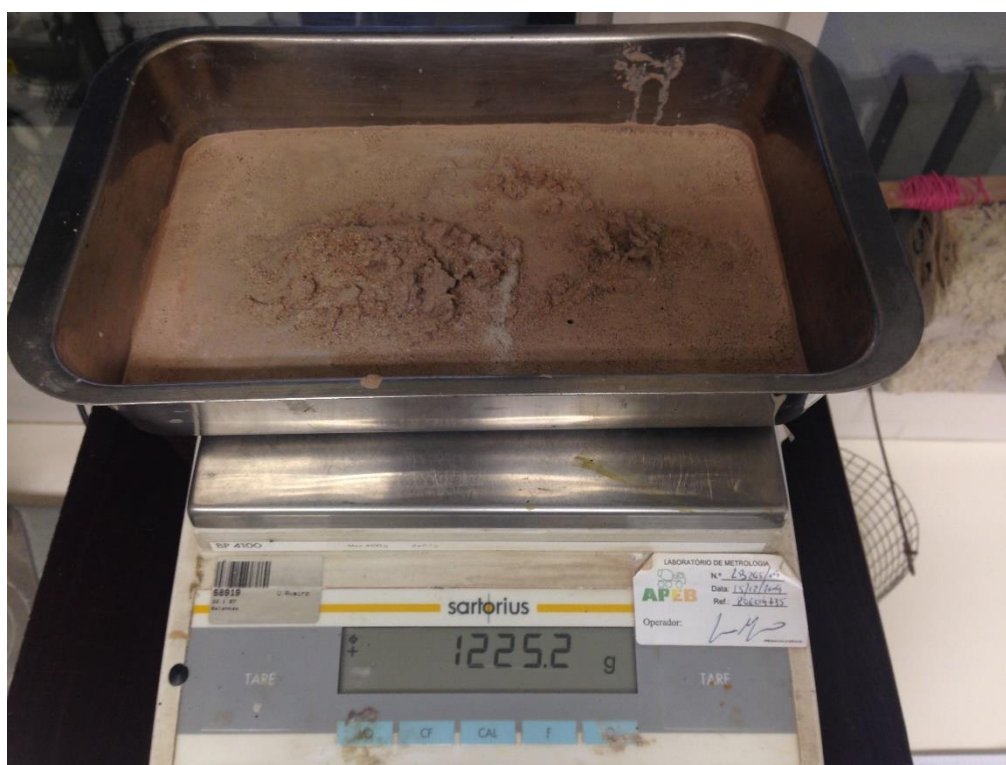


Figura 14. Exemplo pesagem para determinação do teor humidade, furo 16.

Para a determinação do peso volúmico através da extração de amostras indeformadas é necessário cravar cuidadosamente no solo um tubo de aço de paredes finas de modo a englobar uma amostra cilíndrica. De seguida, as amostras são transportadas para laboratório devidamente fechadas e protegidas da perda de água. Já em laboratório, o peso volúmico é determinado através do método da parafina. Só é possível saber-se o peso volúmico da amostra se se tiver agregados de solo, se o solo for todo remexido não é possível saber o seu peso volúmico. Se isto acontecer, teremos que medir o peso volúmico através de outras

grandezas medidas no solo. Neste caso, como as amostras eram todas remexidas não foi possível determinar esta grandeza.

Em segundo lugar foi calculada a densidade real das partículas sólidas através do método do picnómetro (Figura 15). A densidade das partículas sólidas pode ser determinada com a amostra previamente seca em estufa ou com a amostra húmida. Se o solo for de granulometria fina é aconselhável ser com a amostra húmida, se a granulometria for mais grosseira poderá utilizar-se a amostra seca. Este método consiste em colocar uma amostra de solo no picnómetro e pesa-se. De seguida, coloca-se água no picnómetro e deixa-se repousar a amostra durante um dia para que todas as bolhas de ar que se encontram na amostra sejam expulsas. Posteriormente, enche-se o picnómetro com água e volta-se a pesar. Finalmente, efetua-se a pesagem do picnómetro apenas com água. O valor da densidade é dado pela equação (2).

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \times \rho_w \quad (2)$$

Em que,

ρ_s – densidade das partículas sólidas;

m_0 – massa seca do picnómetro, g;

m_1 – massa picnómetro cheio de água, g;

m_2 – massa do picnómetro com amostra seca, g;

m_3 – massa do picnómetro com amostra saturada, g;

m_4 – massa de amostra seca, g;

ρ_w – densidade da água, kg/m³.



Figura 15. Exemplo método do picnómetro, furo 16.

O índice de vazios é obtido através da razão entre o volume de vazios da amostra com o volume de partículas sólidas e a porosidade através da razão entre o volume de vazios e o volume total da amostra. Sendo que o volume de vazios engloba o volume de ar e o volume de água no solo, para ambas as grandezas.

Em último lugar, é importante conhecer a granulometria dos solos e os limites de Atterberg, pois é com base nesta informação que será possível a classificação dos solos.

A granulometria do solo é feita através do método de peneiração com malha quadrada, baseado na norma ISO/TS 17892-4. A dimensão da malha vai diminuindo de peneiro para peneiro e esta peneiração é mecânica onde os peneiros são submetidos a movimentos de translação e de rotação. Nesta fase optou-se pela prévia lavagem do solo (Figura 16) para uma correta caracterização dos finos presentes nas amostras. As amostras que tivessem uma quantidade de solo inferior a 500 gramas não se efetuavam a lavagem do mesmo. Assim, em apenas 2 amostras dos dois furos não se efetuou lavagem. A norma utilizada para a granulometria foi a ISO 17892-4 e a lavagem foi feita no peneiro de 63 μ m e o material passado foi seco em estufa a 60°C para ser efetuada a sua caracterização pelo *Sedigraph*. O material retido foi seco em estufa a 100°C e foi feita a granulometria pela série de peneiros da norma (Figura 17).



a) Lavagem do solo, furo 17.



b) Solo lavado para secagem em estufa, furo 17.

Figura 16. Lavagem solo, furo 17.



Figura 17. Método da peneiração.

Para os limites de Atterberg é importante saber o limite de liquidez (w_L) e o limite de plasticidade (w_P), ambos baseados na norma ISO/TS 17892-12. Para o limite de liquidez foram realizados os ensaios de concha de Casagrande (Figura 18) e do Penetrômetro (Figura 19). Estes ensaios foram realizados para as amostras com mais de 50% de material passado no peneiro 425 μ m. Estes métodos são explicados com mais detalhe nos capítulos seguintes.

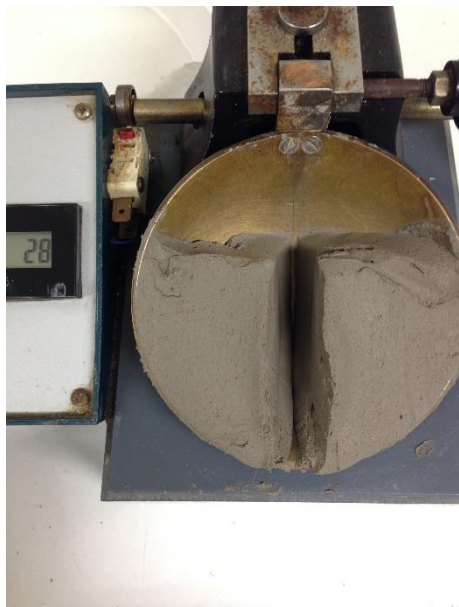


Figura 18. Concha Casagrande, furo 16.

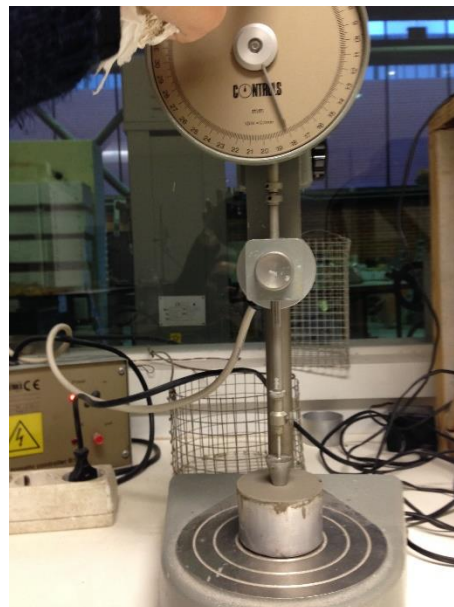


Figura 19. Penetrômetro, furo 16.

3.1.1. Limite de liquidez (w_L)

O limite de liquidez é determinado pelo método da concha de Casagrande, baseado na norma ISO/TS 17892-12, Figura 20, e que consiste em colocar uma amostra de solo na concha de Casagrande e com o riscador é executado um sulco no solo, separando o solo em duas partes. Em seguida, gira-se a manivela do aparelho e contam-se os golpes necessários para que as duas partes de solo se voltem a juntar. O limite de liquidez é considerado o teor em água após as 25 pancadas da concha de Casagrande.

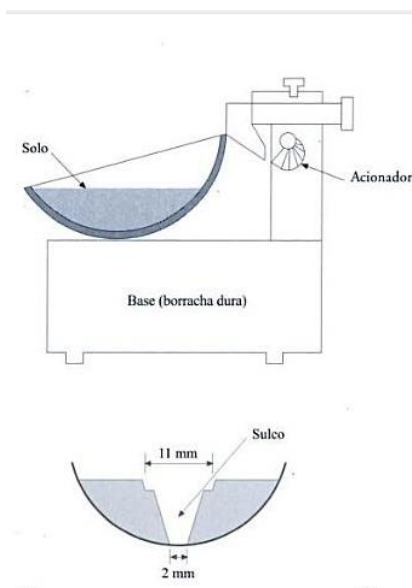


Figura 20. Equipamentos para determinar o limite de liquidez (método de Casagrande), (Matos Fernandes, 2011).

Outro método para a determinação do limite de liquidez é o método do *fall-cone test*, baseado na norma ISO/TS 17892-12, Figura 21. Este método consiste em colocar uma pasta de solo numa taça cilíndrica metálica e nivelada até cobrir toda a taça. De seguida, é deixado cair livremente o cone e a haste, durante 5 segundos, penetrando no solo. Este ensaio é repetido várias vezes de modo a fazer um gráfico que dá a penetração em função do teor de água no solo. O limite de liquidez é o valor do teor em água, para uma penetração de 20 mm.

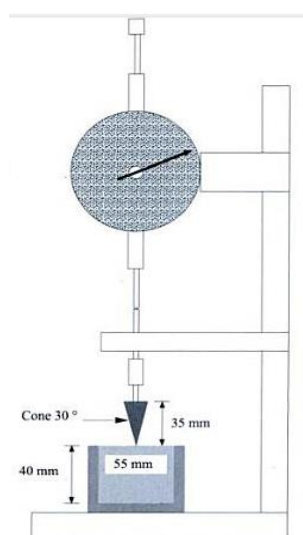


Figura 21. Equipamento para determinar o limite de liquidez (método do *fall-cone test*), (Matos Fernandes, 2011).

3.1.2. Limite de plasticidade (w_P)

Para a determinação do limite de plasticidade é necessário, em primeiro lugar, preparar uma pasta de solo e separar essa mesma pasta em quatro partes de volume semelhante. De seguida, pega-se em cada uma das partes e rola-se entre a palma da mão e uma laca de vidro até formar um filamento cilíndrico com aproximadamente 3 mm de diâmetro, Figura 22. Após este processo, volta-se a formar uma esfera com o solo e repete-se o processo anterior. Este processo repete-se até que o filamento se quebre em várias partes quando atinge os 3 mm de diâmetro. O limite de plasticidade é a média aritmética das quatro amostras que foram preparadas aquando o processo acima referido.



Figura 22. Exemplo ensaio plasticidade, furo 16.

3.2. Caracterização Mecânica

Na caracterização mecânica foram realizados ensaios de corte direto onde se fez variar a temperatura da água presente na caixa durante o ensaio, Figura 23. Os ensaios de corte direto foram realizados segundo a norma ASTM D 3080-90 – *Standard test method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Para o aquecimento e arrefecimento da água foi criado um aquário onde se introduziu água e uma bomba para aquecer a água. Quando era necessário arrefecer a água era colocado gelo no aquário. Para fazer circular a água até à caixa de corte foram introduzidas bombas. Estes ensaios foram realizados com a água a 3 temperaturas diferentes, 10°C, 20°C e 40°C, e para cada temperatura foram realizados ensaios com 3 pesos diferentes, 4 Kg, 8 Kg e 16 Kg, que corresponde em tensão a 11 kPa, 22 kPa e 44 kPa respetivamente. Inicialmente pensou-se em utilizar 32 Kg em vez de 4 Kg, mas como se utilizou um anel de 3 kN e este não suportava a deformação provocada por este peso, optou-se pela utilização do peso de 4 Kg para se poder obter o terceiro ponto da reta de

tensão. O controlo da temperatura foi feito medindo a temperatura antes e após o ensaio, como eram ensaios relativamente rápidos verificou-se que a temperatura não se alterava.

Os solos utilizados foram dos furos acima mencionados a profundidades para o furo 16 entre os 78 e os 84 metros e para o furo 17 entre os 96 e os 102 metros. Foi também realizado um ensaio com uma areia padrão de características físicas conhecidas, sem qualquer percentagem de argila, para se poder comparar com os resultados obtidos nos solos dos furos.

Este ensaio consiste em colocar na parte inferior da caixa de corte o bloco de pressão e uma placa porosa, aparafusar a esta a parte superior da caixa de corte e medir o comprimento interior da caixa de corte e de uma placa porosa. De seguida, colocar a amostra na caixa de corte uniformemente distribuída e colocar a outra placa porosa por cima da amostra, compactar a amostra com o bloco de pressão superior. Colocar a caixa de corte dentro do mecanismo de corte e fixá-la com os parafusos laterais e colocar o defletómetro vertical a zero. Aplicar a carga e colocar água no interior do mecanismo, de modo a submergir todo o conjunto. Esta água foi submetida a 3 temperaturas diferentes como referido anteriormente e a amostra foi deixada 24 horas no mecanismo de corte para que a amostra estabiliza-se e sature-se totalmente. Por fim, retira-se os parafusos da caixa de corte e inicia-se o ensaio até se verificar o corte da amostra. O corte dá-se quando no defletómetro do anel de 3 kN o seu valor entra num patamar constante e se seguida o seu valor diminui. Os valores são registados de 15 em 15 segundos.



Figura 23. Aparato experimental do ensaio corte direto com introdução de temperatura.

Paristech, P. et al. (2016), realizaram ensaios de corte direto sob efeito de temperatura em areias e argilas, em que submeteu a água a 5°C, 20°C e 40°C, e concluíram que a temperatura não influencia a resistência de corte das amostras. O processo de aquecimento da água foi ligeiramente diferente pois, em vez de aquecer a água num reservatório e fazê-la circular para a caixa, aqueceram a água diretamente um transdutor de temperatura e envolveu a caixa com uma manta térmica para controlar a temperatura da água e para que esta se mantivesse constante.

4. RESULTADOS

Neste capítulo estão compilados os resultados obtidos através dos ensaios da caracterização física e caracterização mecânica.

4.1. Caracterização Física

Apresentam-se os resultados dos ensaios da caracterização física dos solos dos furos 16 e 17, como referido anteriormente. É importante referir que algumas características físicas, nomeadamente os limites de Atterberg da parte argila dos solos mais arenosos, não foi realizada devido à limitada quantidade de amostra de solo. A densidade aparente também não foi determinada pois as amostras eram todas remexidas. Na parte da granulometria realizou-se, sempre que possível, a lavagem do solo para melhor caracterização, este processo não foi realizado em apenas 2 solos do furo 16 também devido à falta de solo para posteriormente realizar os ensaios dos limites de Atterberg.

- Resultados furo 16:

De seguida apresentam-se todos os resultados das características físicas relativas ao furo 16.

Tabela 1. Características físicas dos solos do furo 16, dos 0 aos 60 metros.

<i>Profundidade (m)</i>	<i>G_s</i>	<i>passado #200</i>	<i>tipo solo</i>	<i>passado #4</i>	<i>w_l (%)</i>	<i>w_p (%)</i>	<i>w (%)</i>	<i>I_p</i>		<i>% finos</i>		<i>Símbolo do grupo</i>	<i>Nome</i>
0 – 6	2,62	> 50%	Solo fino	-		16,69	13,74	-	-	-	-	ML	Siltes arenoso
6 – 12	2,65	> 50%	Solo fino	-	33,64	18,36	16,31	15,28	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
12 – 18	2,60	> 50%	Solo fino	-	51,76	27,58	20,45	24,17	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CH	Argila gorda
18 – 24	2,65	< 50%	Solo grosso	> 50%	31,27	19,06	10,58	12,21	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
24 – 30	2,68	> 50%	Solo fino	-	39,06	21,78	18,01	17,28	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
30 – 36	2,67	> 50%	Solo fino	-	30,07	14,73	15,96	15,34	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
36 – 42	2,68	> 50%	Solo fino	-	32,25	16,61	15,03	15,64	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
42 – 48	2,63	> 50%	Solo fino	-		18,72	16,14	-	-	-	-	CL	Argila magra
48 – 54	2,61	> 50%	Solo fino	-	33,11	16,17	51,11	16,94	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
54 – 60	2,63	> 50%	Solo fino	-	39,91	19,15	43,83	20,76	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia

Tabela 2. Características físicas dos solos do furo 16, dos 60 aos 132 metros.

<i>Profundidade (m)</i>	<i>G_s</i>	<i>passado #200</i>	<i>tipo solo</i>	<i>passado #4</i>	<i>w_l (%)</i>	<i>w_p (%)</i>	<i>w (%)</i>	<i>I_p</i>		<i>% finos</i>		<i>Símbolo do grupo</i>	<i>Nome</i>
60 – 66	2,67	> 50%	Solo fino	-	38,81	18,60	46,82	20,21	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
66 – 72	2,61	> 50%	Solo fino	-	35,82	18,35	43,59	17,47	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
72 – 78	2,56	> 50%	Solo fino	-	37,44	17,07	41,78	20,38	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
78 - 84	2,64	< 50%	Solo grosso	> 50%		13,86	24,57	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
84 – 90	2,62	> 50%	Solo fino	-		15,40	31,44			-		ML	Siltes arenoso
90 – 96	2,59	< 50%	Solo grosso	> 50%			27,58	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
96 – 102	2,62	< 50%	Solo grosso	> 50%			21,20	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
102 – 108	2,63	< 50%	Solo grosso	> 50%			23,70	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
108 – 114	2,62	< 50%	Solo grosso	> 50%			24,07	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
114 – 120	2,58	< 50%	Solo grosso	> 50%			22,84	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
120 – 126	2,67	< 50%	Solo grosso	> 50%			22,18	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa
126 - 132	2,67	< 50%	Solo grosso	> 50%			25,31	-	Areia	> 12%		SC	Areia argilosa

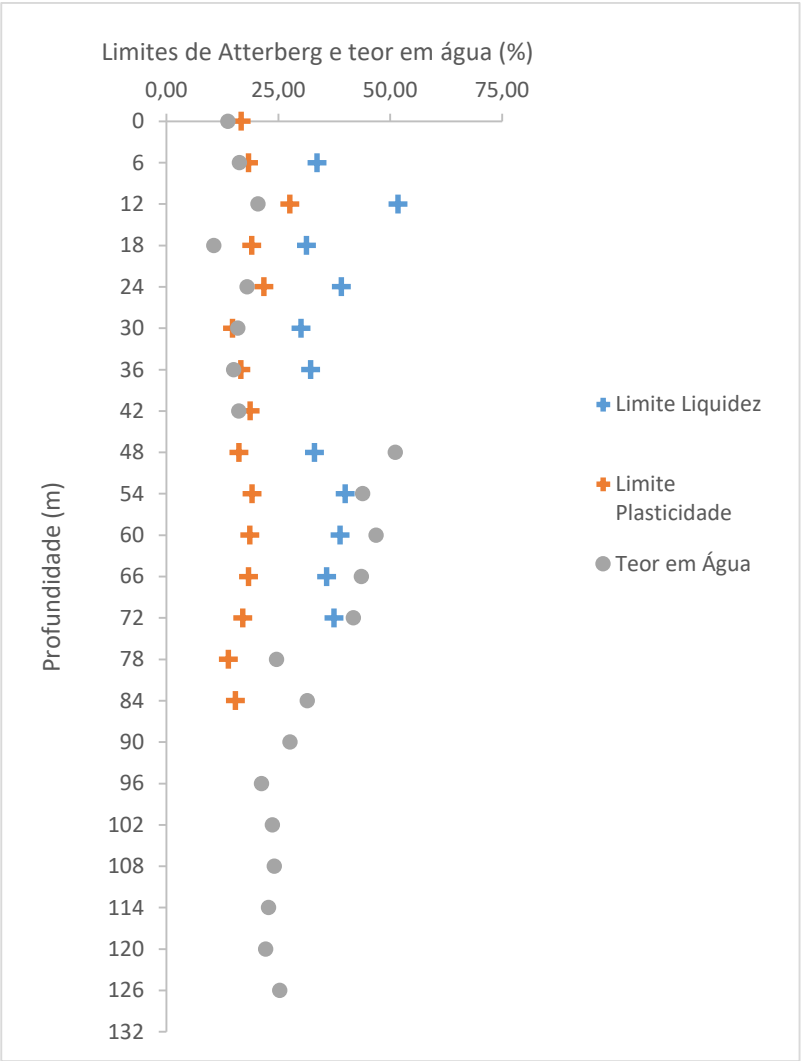


Gráfico 1. Distribuição dos limites de Atterberg ao longo do furo 16.

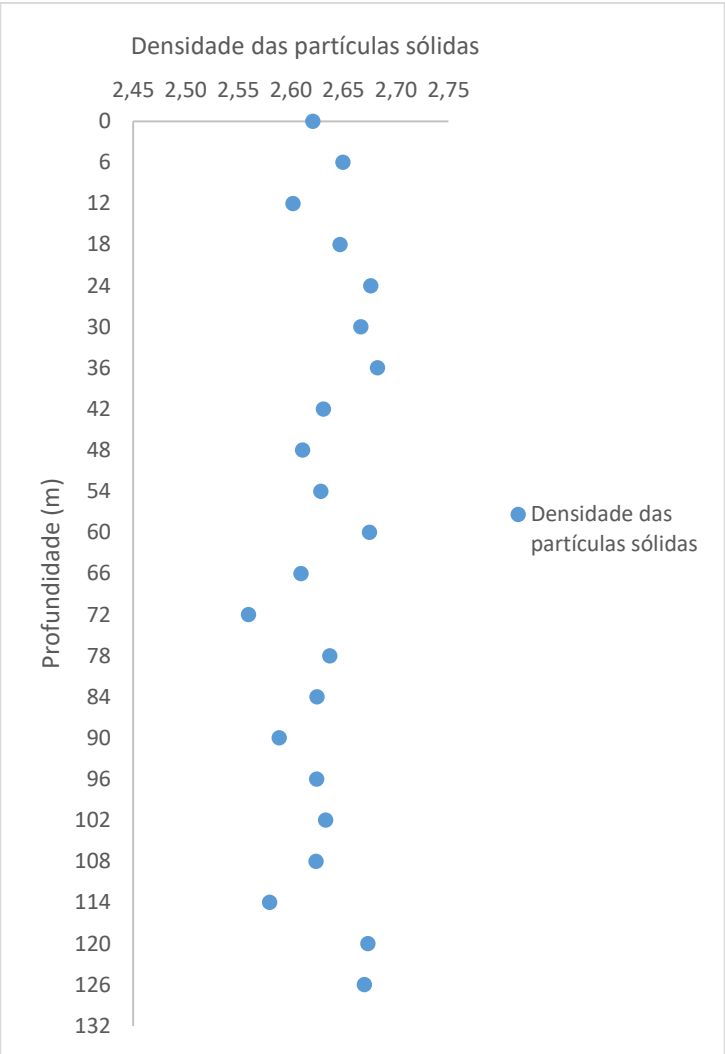


Gráfico 2. Distribuição da densidade das partículas sólidas ao longo do furo 16.

Apresentam-se de seguida os gráficos de distribuição granulométrica das amostras que foram submetidas ao ensaio de corte direto. O gráfico representa a distribuição granulométrica da amostra antes do ensaio de corte direto. Os restantes gráficos podem ser encontrados nos Anexos 2 e 3.

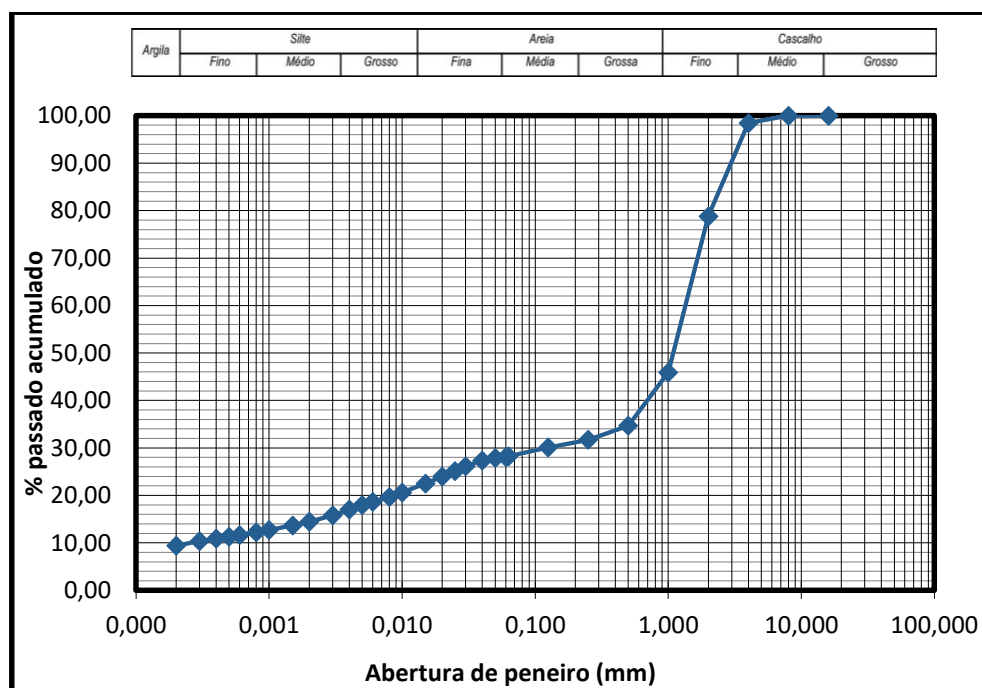


Gráfico 3. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros.

- Resultados furo 17:

Apresentam-se em baixo todos os resultados das características físicas relativas ao furo 17.

Tabela 3. Características físicas dos solos do furo 17, dos 0 aos 60 metros.

<i>Profundidade (m)</i>	<i>G_s</i>	<i>passado #200</i>	<i>tipo solo</i>	<i>passado #4</i>	<i>w_l (%)</i>	<i>w_p (%)</i>	<i>w (%)</i>	<i>I_p</i>		<i>% finos</i>		<i>Símbolo do grupo</i>	<i>Nome</i>
0 – 6	2,64	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	9,3	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
6 – 12	2,61	> 50%	Solo fino	-	-	-	18,4	-	Siltes e argilas	-	Inorgânico	ML	Siltes arenosos
12 – 18	2,56	> 50%	Solo fino	-	43,74	21,00	19,4	22,74	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
18 – 24	2,58	> 50%	Solo fino	-	40,18	22,14	17,2	18,05	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
24 – 30	2,52	> 50%	Solo fino	-	52,56	25,34	23,4	27,22	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
30 – 36	2,58	> 50%	Solo fino	-	35,70	19,95	38,8	15,76	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
36 – 42	2,53	> 50%	Solo fino	-	40,67	17,97	38,6	22,70	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
42 – 48	2,56	> 50%	Solo fino	-	41,61	19,36	43,2	22,24	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
48 – 54	2,54	> 50%	Solo fino	-	38,38	19,51	34,4	18,86	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
54 – 60	2,58	> 50%	Solo fino	-	36,13	16,83	50,9	19,30	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia

Tabela 4. Características físicas dos solos do furo 17, dos 60 aos 132 metros.

<i>Profundidade (m)</i>	<i>G_s</i>	<i>passado #200</i>	<i>tipo solo</i>	<i>passado #4</i>	<i>w_l (%)</i>	<i>w_p (%)</i>	<i>w (%)</i>	<i>I_p</i>		<i>% finos</i>		<i>Símbolo do grupo</i>	<i>Nome</i>
60 – 66	2,56	> 50%	Solo fino	-	39,78	18,47	38,7	21,32	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra com areia
66 – 72	2,62	> 50%	Solo fino	-	40,20	16,39	55,2	23,81	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
72 – 78	2,64	> 50%	Solo fino	-	38,18	15,97	32,9	22,21	Siltes e argilas	-	Inorgânico	CL	Argila magra
78 - 84	2,56	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	21,9	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
84 – 90	2,58	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	21,7	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
90 – 96	2,56	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	21,8	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
96 – 102	2,62	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	20,4	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
102 – 108	2,62	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	20,8	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
108 – 114	2,62	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	19,7	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
114 – 120	2,64	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	20,3	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
120 – 126	2,65	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	19,3	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa
126 - 132	2,65	< 50%	Solo grosso	> 50%	-	-	21,6	-	Areia	> 12%	-	SC	Areia argilosa

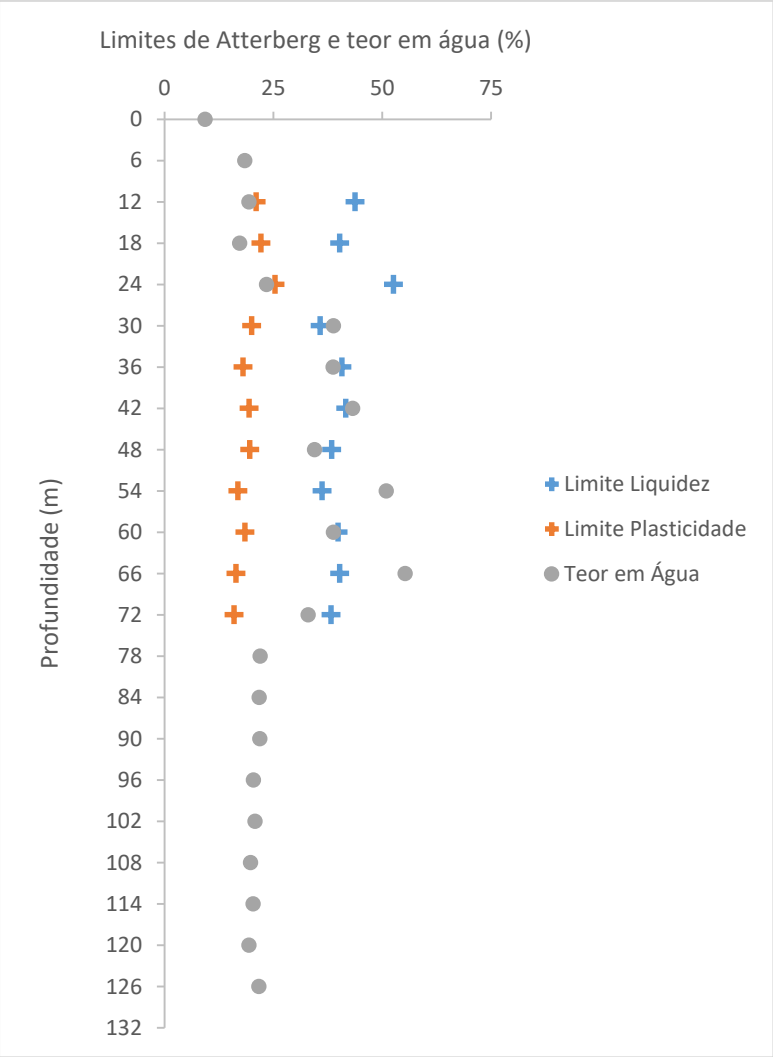


Gráfico 4. Distribuição dos limites de Atterberg ao longo do furo 17.

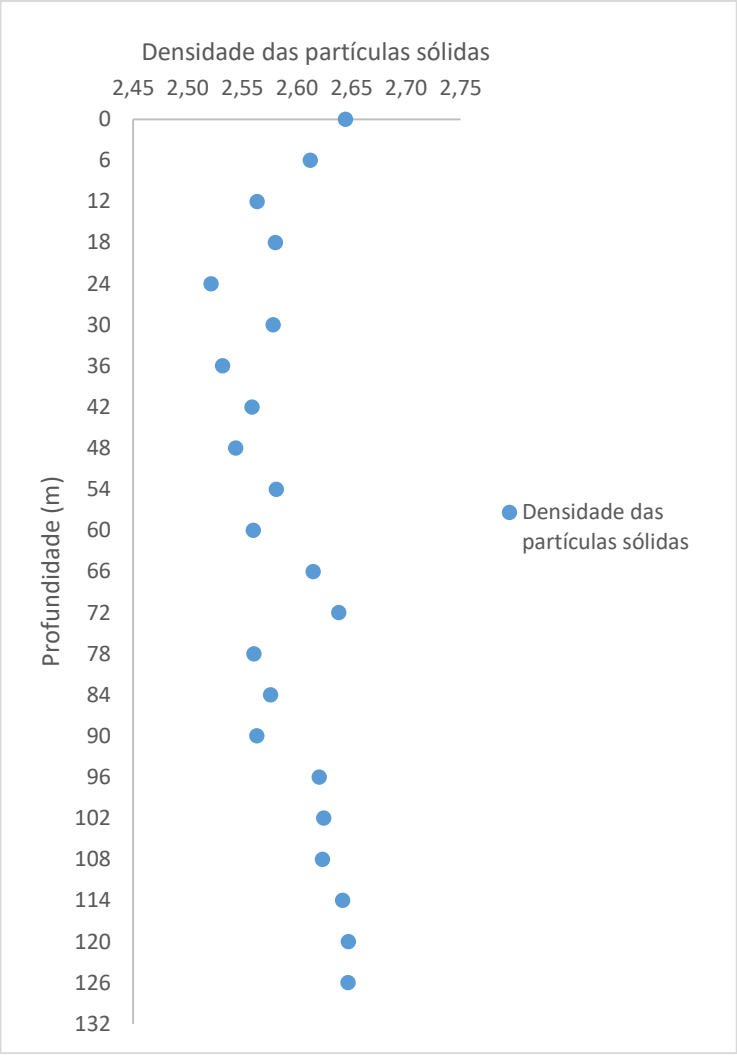


Gráfico 5. Distribuição da densidade das partículas sólidas ao longo do furo 17.

Apresentam-se agora os gráficos de distribuição granulométrica das amostras que foram submetidas ao ensaio de corte direto. O gráfico representa a distribuição granulométrica da amostra antes do ensaio de corte direto. Os restantes gráficos podem ser encontrados em Anexo 2 e 3.

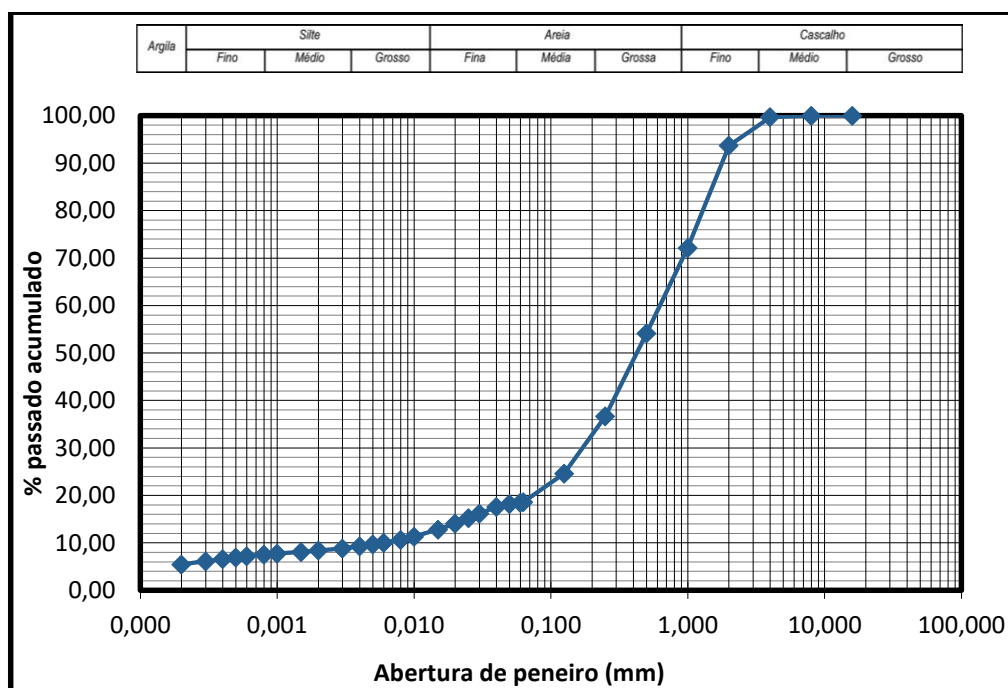


Gráfico 6. Distribuição granulométrica da amostra dos 96m aos 102 metros.

4.2. Caracterização Mecânica

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização mecânica. Como referido anteriormente estes ensaios foram realizados com uma particularidade, a água na caixa de ensaio foi submetida a 3 temperaturas diferentes para permitir verificar se a temperatura que é permutada entre o sistema geotérmico e o solo tem alguma influência da resistência mecânica, neste caso resistência ao corte, do mesmo.

Inicialmente serão apresentados todos os resultados dos ensaios dos 2 furos e do ensaio padrão da areia para comparação de resultados e posteriormente, apresentar-se-á a conclusão final.

4.2.1. Resultados do ensaio padrão da areia

Efetuarão-se alguns ensaios para determinar as características físicas da areia para o ensaio padrão de comparação, nomeadamente a densidade das partículas sólidas e a

granulometria. Assim, para a densidade das partículas obteve-se o valor de 2,66 e o gráfico de distribuição granulométrica é o seguinte:

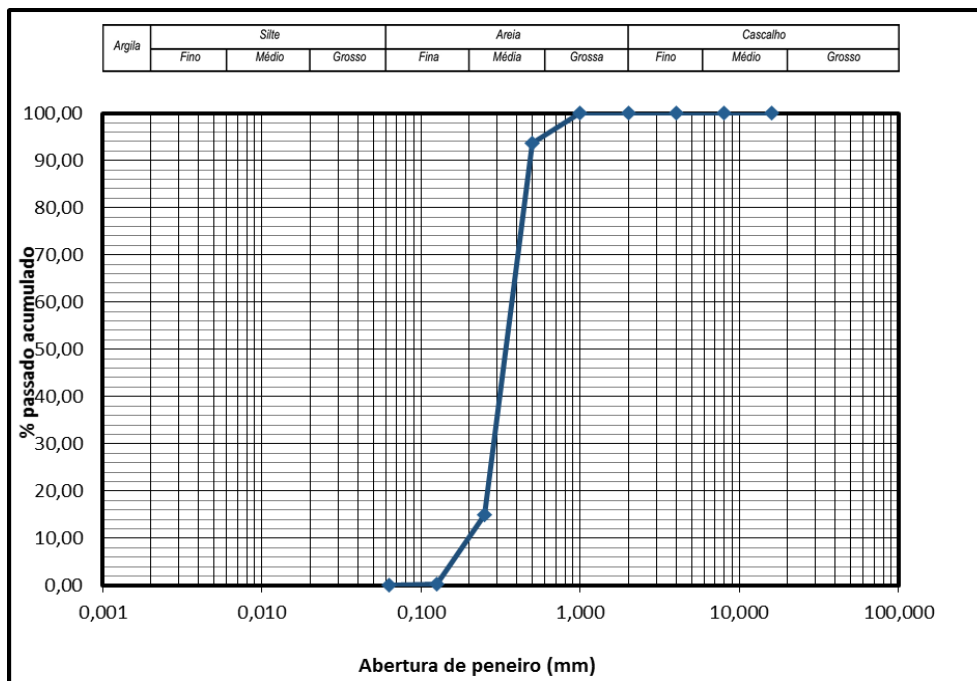


Gráfico 7. Distribuição granulométrica da amostra de areia.

Para uma temperatura de 10° mostram-se nos Gráficos 8 e 9, as relações deslocamento horizontal-tensão de corte e deslocamento horizontal-deslocamento vertical. Na Tabela 5 apresentam-se as relações obtidas no ensaio entre as tensões de corte e as tensões normais, cuja representação gráfica se mostra no Gráfico 10.

Em seguida (Gráficos 13 a 16) e Tabelas 6 e 7, mostram-se as mesmas relações para as outras temperaturas ensaiadas: 20° e 40°C.

- Resultados com a água à temperatura de 10°C:

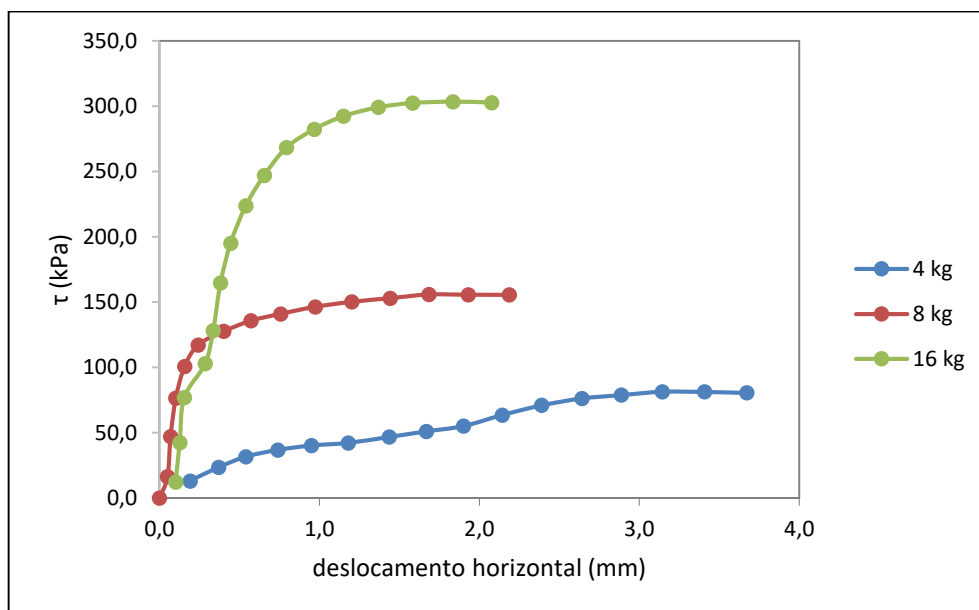


Gráfico 8. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 10°C (areia padrão).

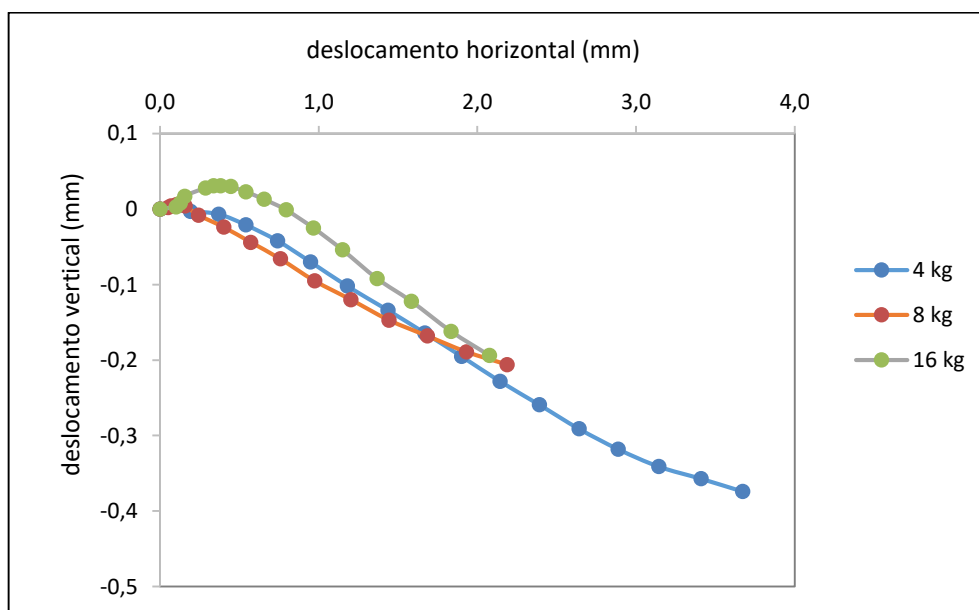
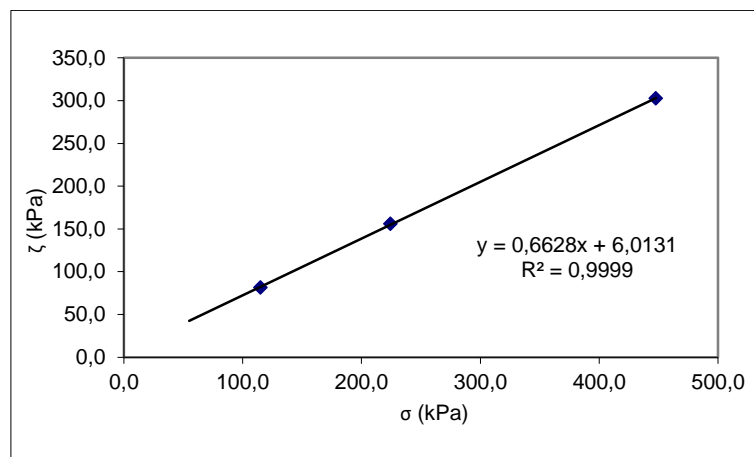


Gráfico 9. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 10°C (areia padrão).

Tabela 5. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (areia padrão).

σ (kPa)	ζ (kPa)
115,0	81,47
224,3	155,86
447,8	302,46

Gráfico 10. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 10°C (areia padrão).

Pela análise dos resultados anteriores é possível verificar que a coesão do solo a 10°C é de 6,01 kPa. Obtém-se uma coesão nula, tal como seria de esperar. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, de valor 33,5°.

- Resultados com a água à temperatura de 20°C:

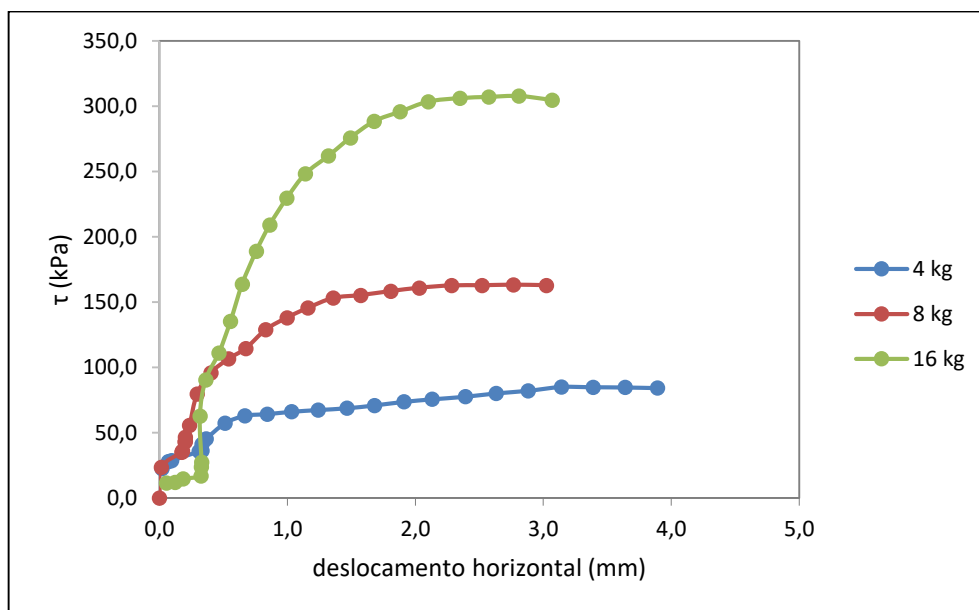


Gráfico 11. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 20°C (areia padrão).

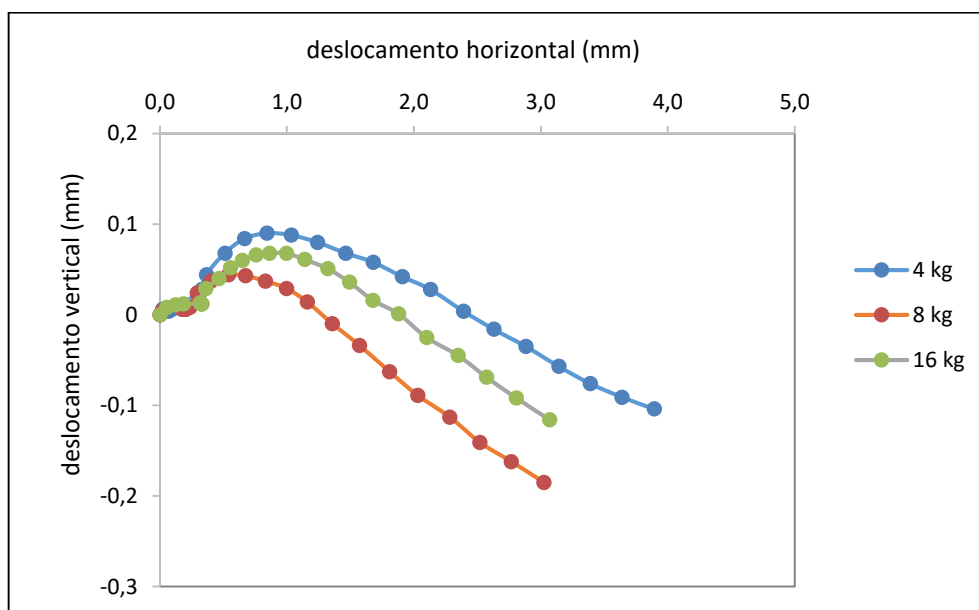


Gráfico 12. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 20°C (areia padrão).

Tabela 6. Valores da tensão normal e tensão de corte a com a água à temperatura de 20°C (areia padrão).

σ (kPa)	ζ (kPa)
114,5	82,212
226,6	162,717
457,4	307,825

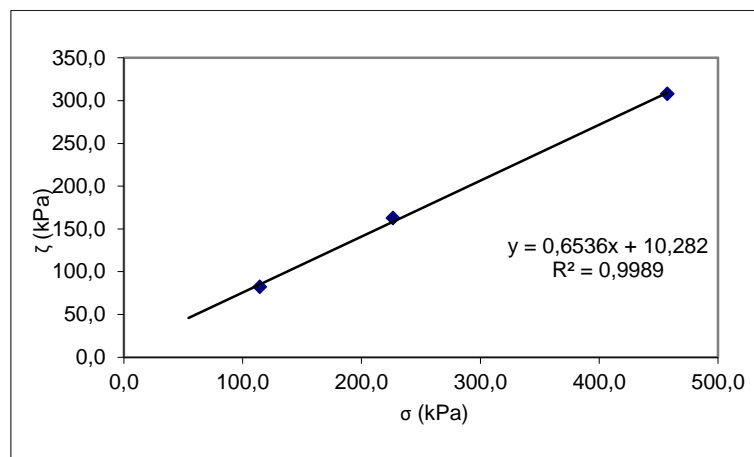


Gráfico 13. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 20°C (areia padrão).

Pela análise dos resultados anteriores é possível verificar que a coesão do solo a 20°C é de 10,28 kPa. Tratando-se de uma areia, e como esta não tem coesão, este valor é desprezável. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, obtendo-se o valor de 33,2°.

- Resultados com a água à temperatura de 40°C:

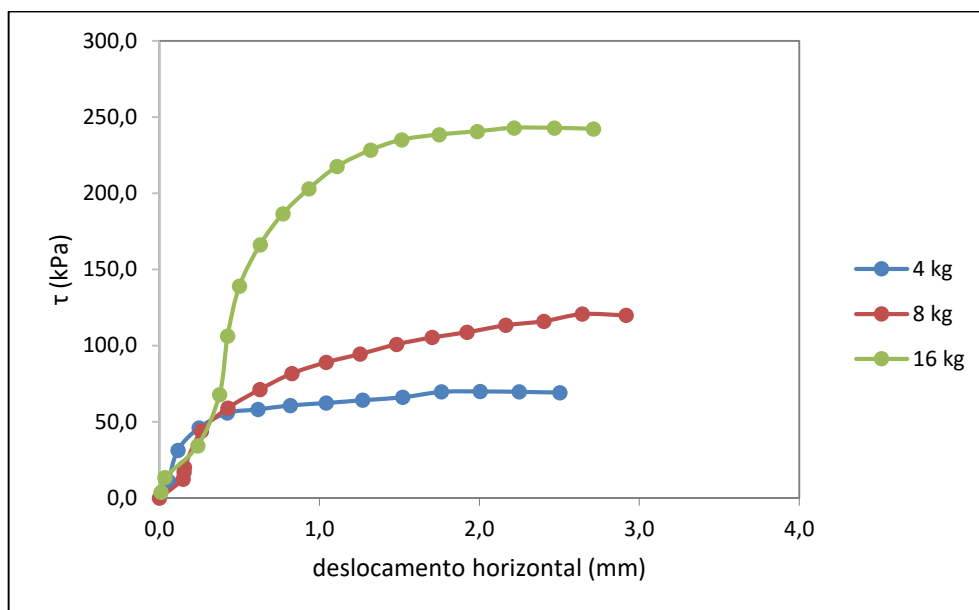


Gráfico 14. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 40°C (areia padrão).

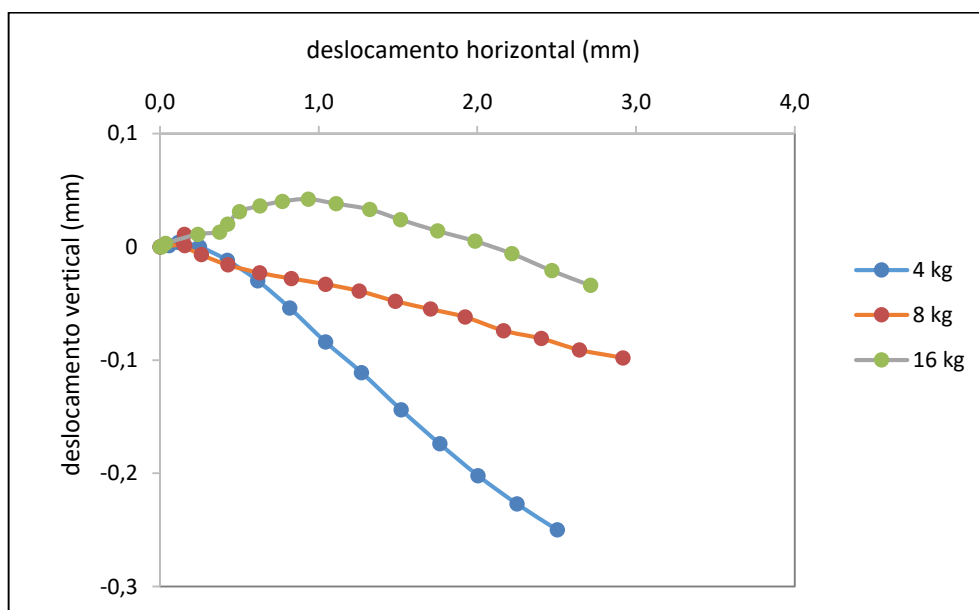
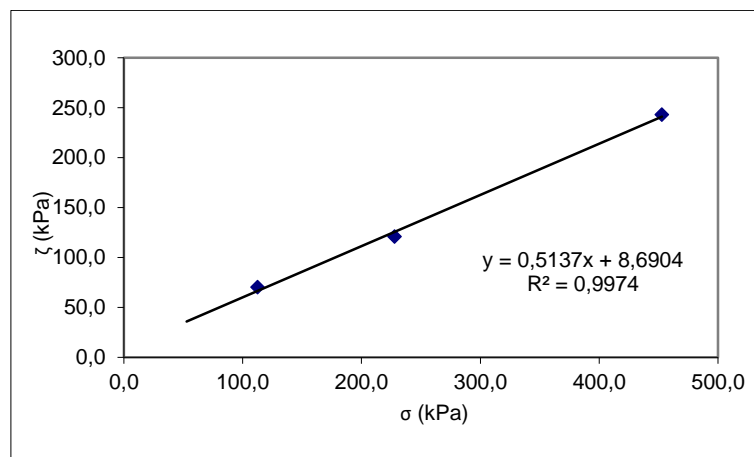


Gráfico 15. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 40°C (areia padrão).

Tabela 7. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (areia padrão).

σ (kPa)	ζ (kPa)
112,8	69,99
228,0	120,72
452,7	242,97

Gráfico 16. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 40°C (areia padrão).

Pela análise dos resultados anteriores é possível verificar que a coesão do solo a 40°C é de 8,69 kPa. Tratando-se de uma areia, e como esta não tem coesão, este valor é desprezável. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, neste caso com o valor é 27,2°.

De seguida apresenta-se uma tabela em que se representam os valores da tensão normal impostos e, através da análise dos respetivos gráficos, para cada temperatura, a tensão de corte calculada, representa-se também a variação da resistência ao corte em (percentagem) entre as diversas temperaturas ensaiadas (20°C, temperatura ambiente, 10°C e 40°C).

Tabela 8. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (areia padrão).

Temperatura (°C)	σ' (kPa)	ζ (kPa)	Variação da resistência (%)
10	150	105,4	-2,7
	250	171,7	-1,1
	500	337,4	0,1
20	150	108,3	-
	250	173,7	-
	500	337,1	-
40	150	85,7	-20,8
	250	137,1	-21,1
	500	265,5	-21,2

Pela análise da tabela é possível verificar que para 10°C a resistência diminui muito ligeiramente, entre 0% e 2%, já para a temperatura de 40°C a resistência diminui cerca de 20%. Neste último caso a percentagem de resistência que diminui é significativa e poderia implicar alguns riscos no solo.

O comportamento volumétrico (dilatância) é significativamente diferente nas três temperaturas ensaiadas.

Apresenta-se em baixo o gráfico resumo de todas as retas de resistência ao corte para melhor percepção dos resultados obtidos.

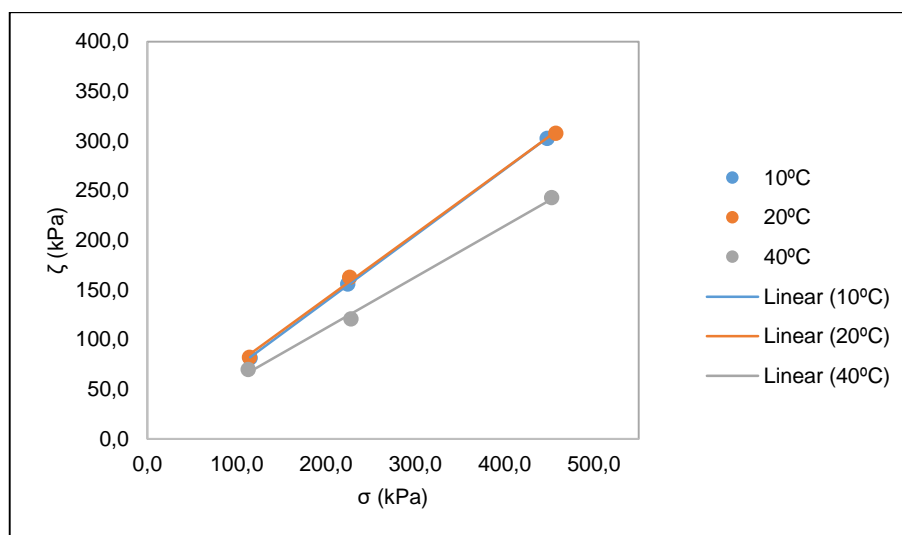


Gráfico 17. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (areia padrão).

Pela análise do gráfico anterior é possível verificar que as retas de 10°C e 20°C são muito semelhantes e que a reta de 40°C varia bastante, isto era de esperar de acordo com os valores das percentagens de resistência que se verificaram na 0.

4.2.2. Resultados furo 16:

No gráfico seguinte encontra-se o resultado da distribuição granulométrica da amostra de solo do furo 16 após o ensaio de corte direto. Verifica-se a existência de uma ligeira diferença dos resultados após o ensaio, nomeadamente uma perda importante da percentagem de finos no solo.

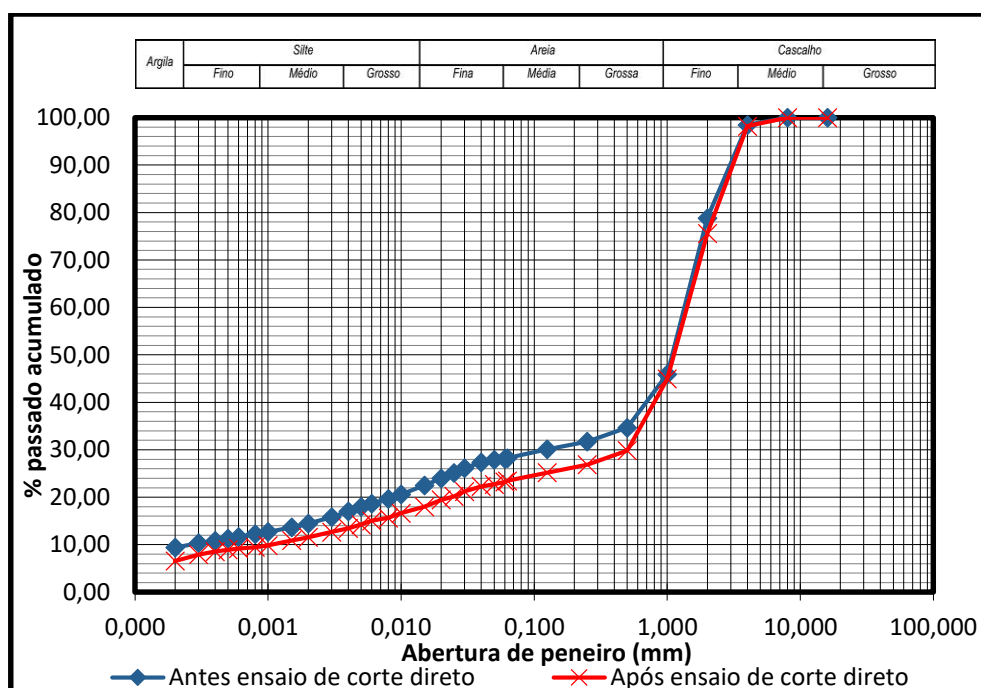


Gráfico 18. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros, antes e após o ensaio de corte direto.

A diferença de percentagem de finos entre a amostra inicial e após o ensaio de corte direto é de 4,6%, portanto, houve perda de finos durante o ensaio de caracterização mecânica.

Para uma temperatura de 10° mostram-se nos Gráficos 19 e 20, as relações deslocamento horizontal-tensão de corte e deslocamento horizontal-deslocamento vertical. Na Tabela 9 apresentam-se as relações obtidas no ensaio entre as tensões de corte e as tensões normais, cuja representação gráfica se mostra no Gráfico 21.

Em seguida (Gráficos 22 a 27) e Tabelas 10 e 11, mostram-se as mesmas relações para as outras temperaturas ensaiadas: 20° e 40°C.

- Resultados com a água à temperatura de 10°C:

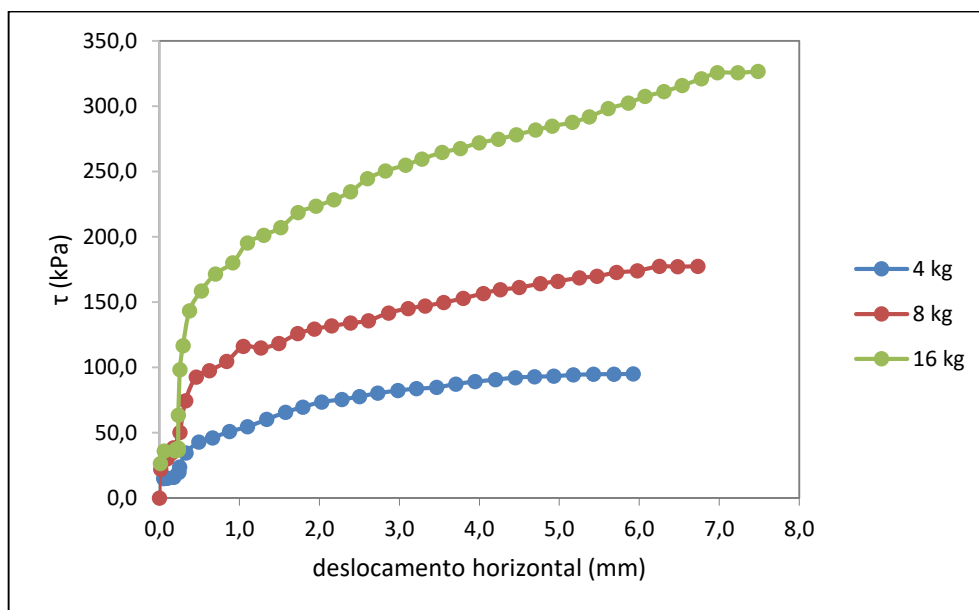


Gráfico 19. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 10°C (solo do furo 16).

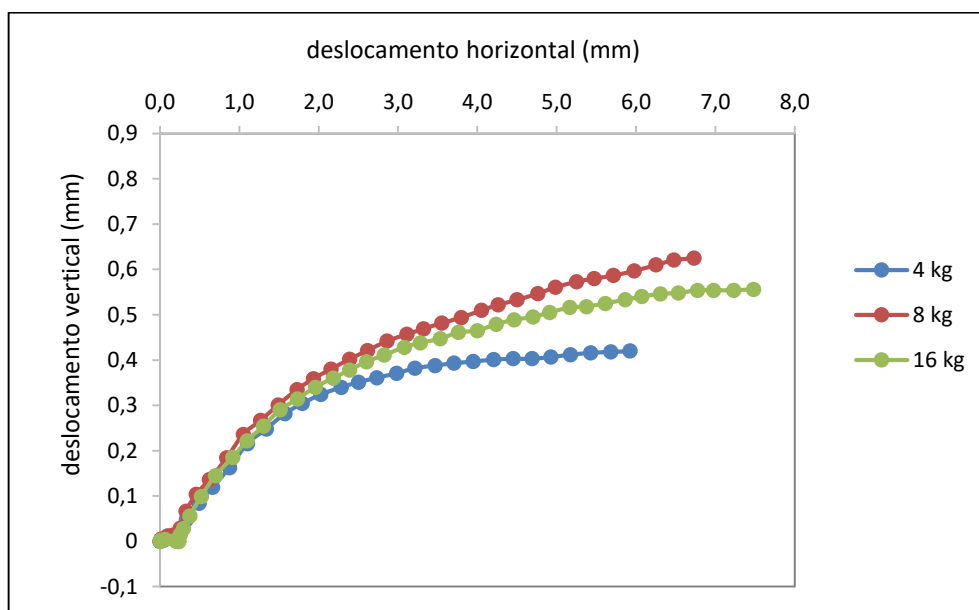
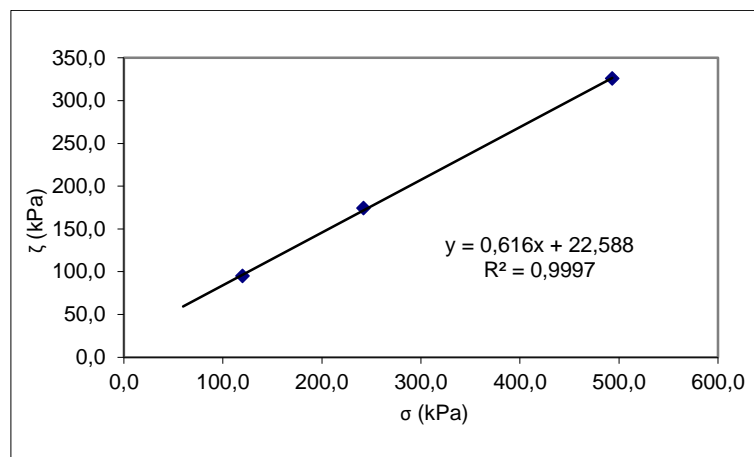


Gráfico 20. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 10°C (solo do furo 16).

Tabela 9. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (solo do furo 16).

σ (kPa)	ζ (kPa)
119,8	94,80
242,1	174,13
493,4	325,73

Gráfico 21. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 10°C (solo do furo 16).

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 10°C é de 22,59 kPa. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, sendo assim, o valor é de 31,6°.

- Resultados com a água à temperatura de 20°C:

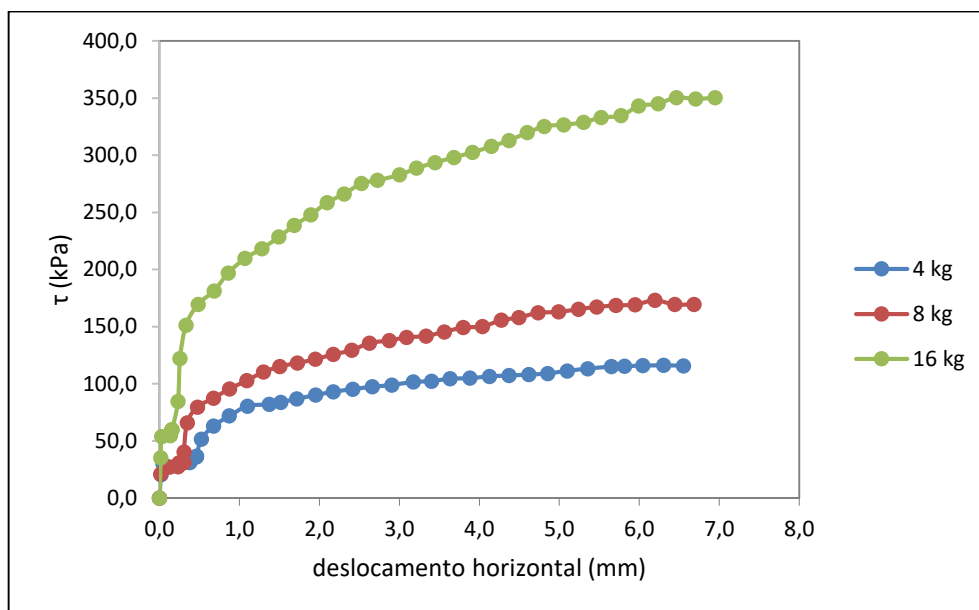


Gráfico 22. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 20°C (solo do furo 16).

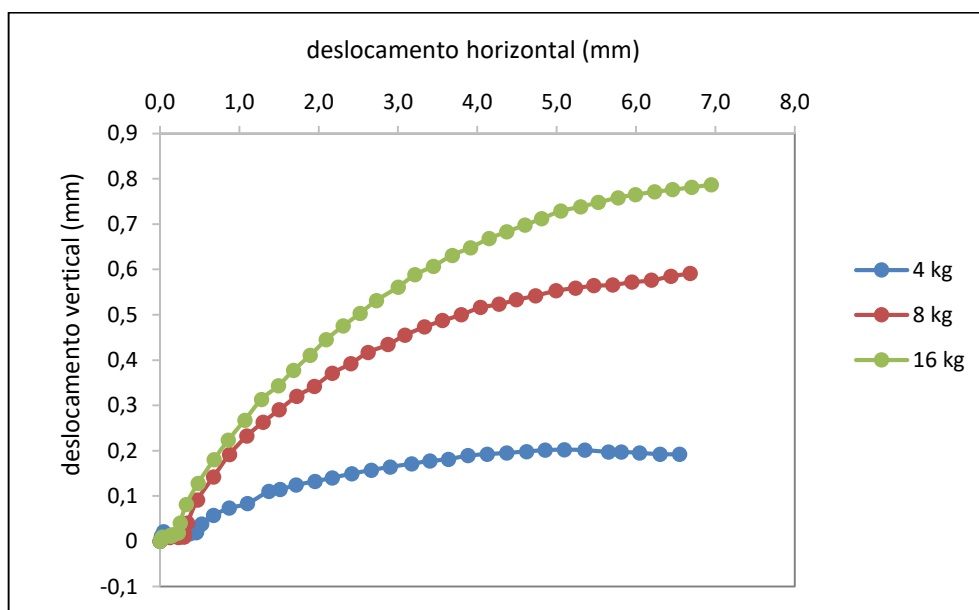


Gráfico 23. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 20°C (solo do furo 16).

Tabela 10. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 20°C (solo do furo 16).

σ (kPa)	ζ (kPa)
121,8	116,21
243,1	173,07
488,6	350,54

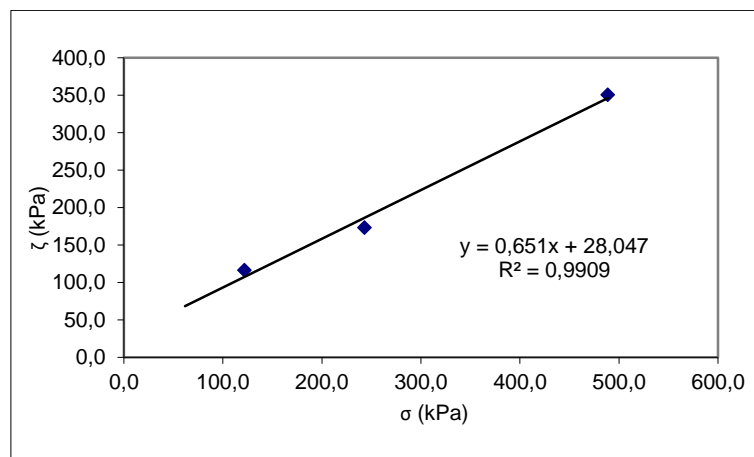


Gráfico 24. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 20°C (solo do furo 16).

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 20°C é de 28,05 kPa. O valor do ângulo de atrito, dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, é de 33,1°.

- Resultados com a água à temperatura de 40°C:

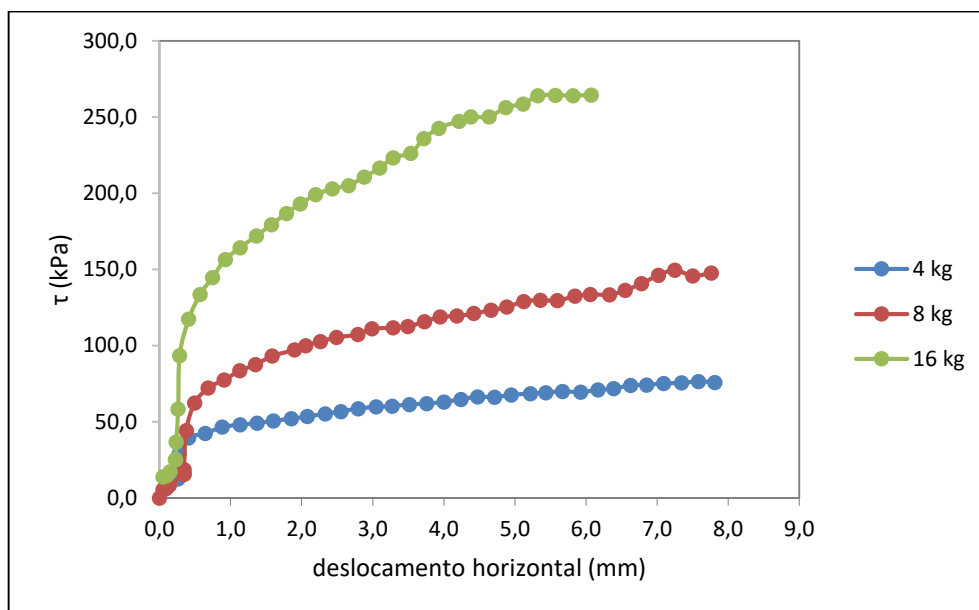


Gráfico 25. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 40°C (solo do furo 16).

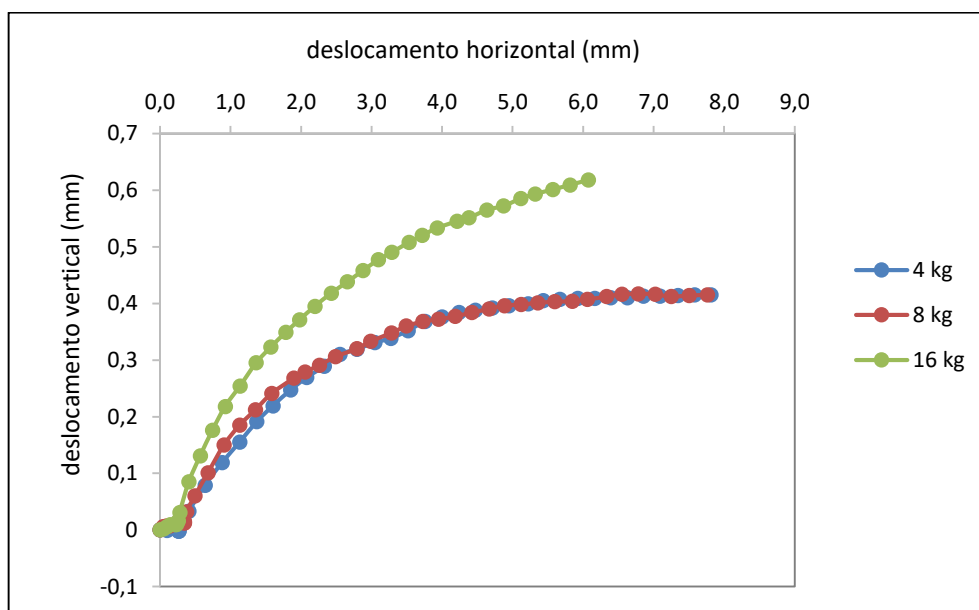


Gráfico 26. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 40°C (solo do furo 16).

Tabela 11. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (solo do furo 16).

σ (kPa)	ζ (kPa)
124,8	76,52
248,0	149,67
480,6	264,37

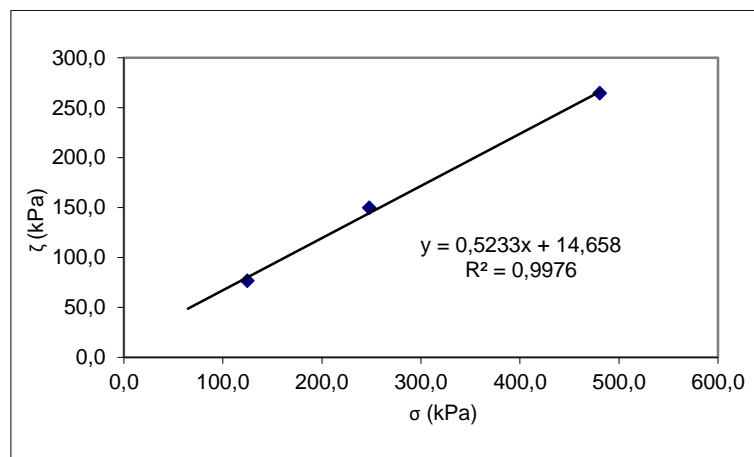


Gráfico 27. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 40°C.

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 40°C é de 14,66 kPa. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, o valor é de 27,6°.

De seguida apresenta-se uma tabela em que se arredondou os valores da tensão normal para valores arredondados e através das equações dos respetivos gráficos para cada temperatura calculou-se a tensão de corte e verificou-se qual a percentagem de resistência que diminui entre os 20°C, temperatura ambiente, e os 10°C e 40°C.

Verificou-se que a temperatura tem também um efeito importante na deformação volumétrica. Os valores mais elevados de dilatação foram obtidos para a amostra submetida à mais elevada tensão normal.

Tabela 12. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (solo do furo 16).

Temperatura (°C)	σ' (kPa)	ζ (kPa)	Variação da resistência (%)
10	150	115,0	-8,5
	250	176,6	-7,4
	500	330,6	-6,5
20	150	125,7	-
	250	190,8	-
	500	353,5	-
40	150	93,2	-25,9
	250	145,5	-23,7
	500	276,3	-21,8

Pela análise da tabela é possível verificar que para 10°C a resistência diminui cerca de 8%, já para a temperatura de 40°C a resistência diminui cerca de 25%. Neste último caso a percentagem de resistência que diminui é significativa e poderia implicar alguns riscos no solo, no entanto este valor pode ser também consequência da perda de finos registada no decurso do ensaio. Mas quando comparado com o ensaio da areia padrão, que não possui qualquer matéria argilosa, os resultados são semelhantes, pois a 40°C também se verifica uma diminuição da resistência do solo. Estes resultados levam a suspeitar que a ausência de finos poderá ter uma influência significativa da dependência da temperatura na resistência ao corte do solo. Verifiquemos agora os resultados do furo 17 e a partir daí tiraremos conclusões mais concretas.

De seguida apresenta-se um gráfico resumo das retas de resistência de corte.

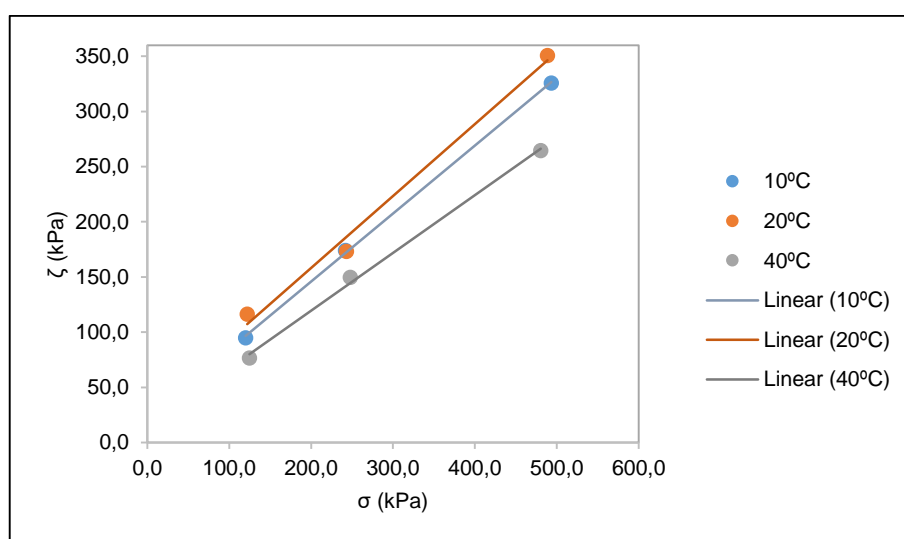


Gráfico 28. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (solo do furo 16).

Pela análise do gráfico é possível verificar que existe uma ligeira variação entre as retas de 10°C e 20°C, não muito significativa e que na reta de 40°C a variação é superior, isto era de esperar de acordo com os valores das percentagens de resistência que se verificaram na Tabela 12.

4.2.3. Resultados furo 17:

No gráfico seguinte encontra-se o resultado da distribuição granulométrica da amostra de solo do furo 17 após o ensaio de corte direto. É possível verificar que não houve uma grande variação dos resultados após o ensaio. O que se deveu a uma alteração no sistema de ensaio através da colocação de uma manta geotêxtil entre o fundo da caixa de corte e a placa porosa.

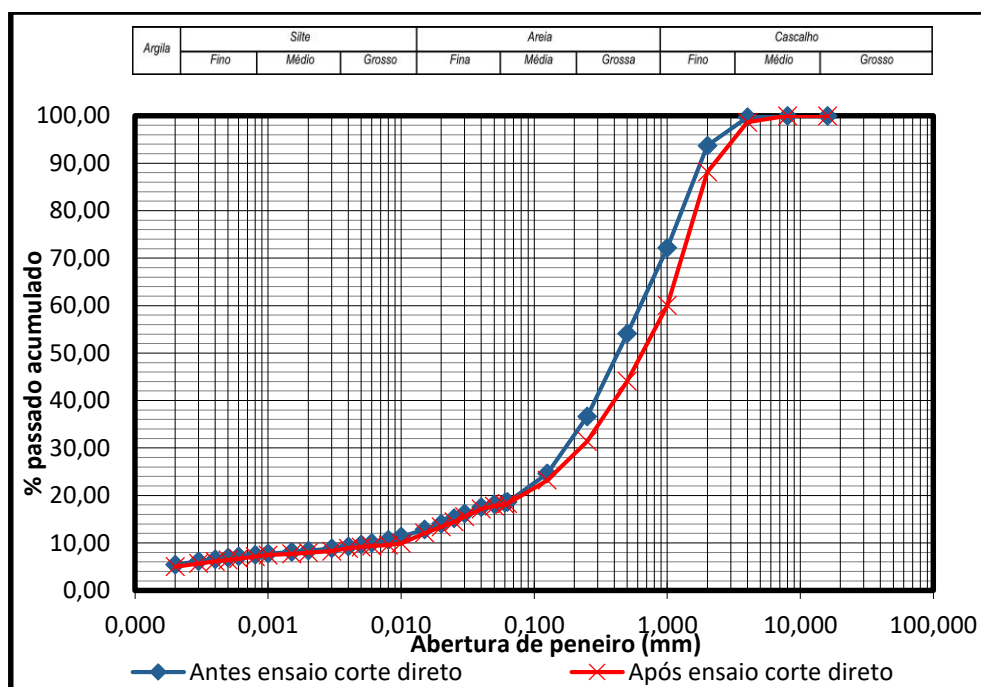


Gráfico 29. Distribuição granulométrica da amostra dos 96 aos 102 metros, antes e após o ensaio de corte direto.

A variação de percentagem de finos entre a amostra inicial e após o ensaio de corte direto foi de 0,46%, portanto, registou-se uma pequena perda de finos durante o ensaio de caracterização mecânica, mas muito inferior à registada no ensaio do solo do furo 16.

Para uma temperatura de 10° mostram-se nos Gráficos 30 e 31, as relações deslocamento horizontal-tensão de corte e deslocamento horizontal-deslocamento vertical. Na Tabela 13 apresentam-se as relações obtidas no ensaio entre as tensões de corte e as tensões normais, cuja representação gráfica se mostra no Gráfico 32.

Em seguida (Gráficos 33 a 39) e Tabelas 14 e 15, mostram-se as mesmas relações para as outras temperaturas ensaiadas: 20° e 40°C.

- Resultados com a água à temperatura de 10°C:

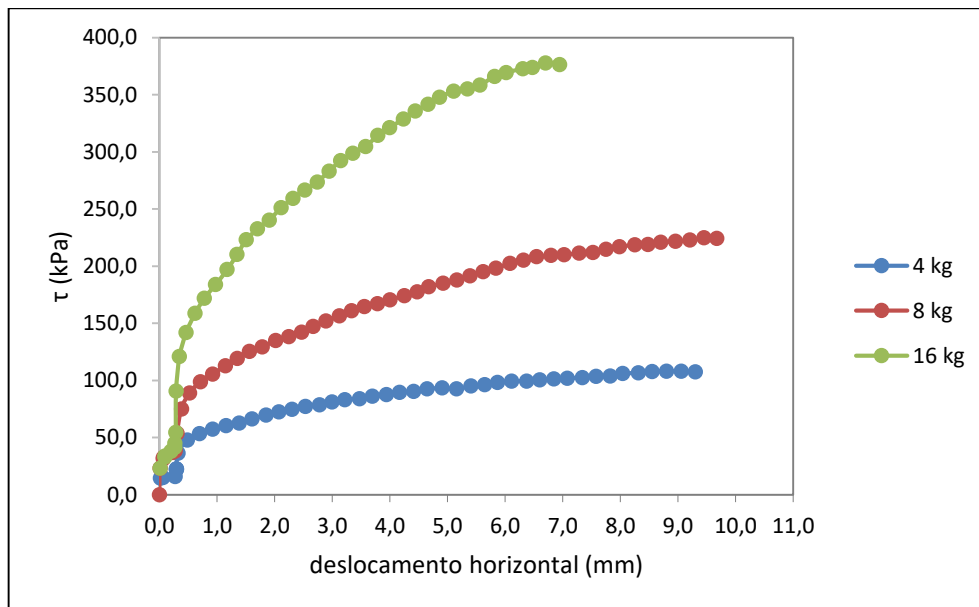


Gráfico 30. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 10°C (solo do furo 17).

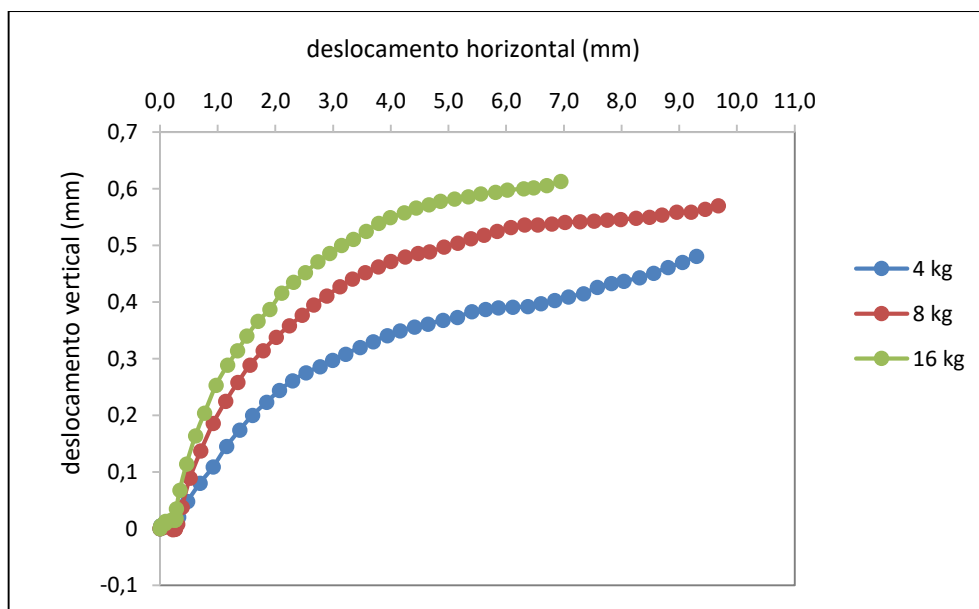


Gráfico 31. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 10°C (solo do furo 17).

Tabela 13. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 10°C (solo do furo 17).

σ (kPa)	ζ (kPa)
127,1	107,67
258,8	224,83
488,7	373,81

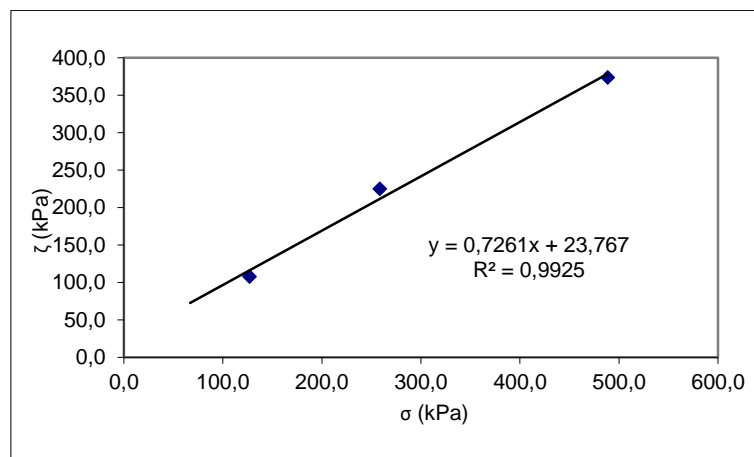


Gráfico 32. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 10°C (solo do furo 17).

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 10°C é de 23,77 kPa. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, é de 36,0°.

- Resultados com a água à temperatura de 20°C:

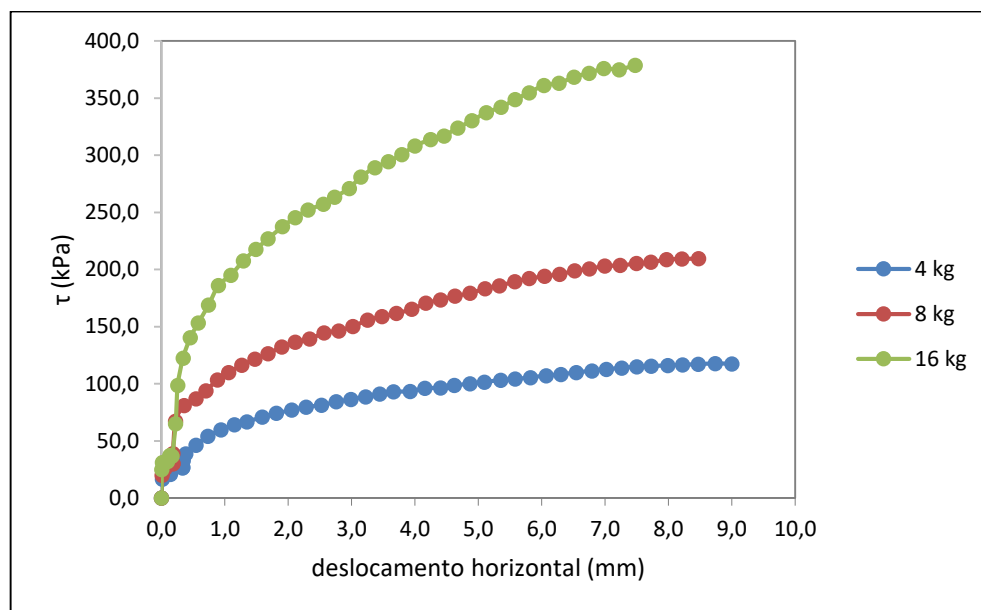


Gráfico 33. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 20°C (solo do furo 17).

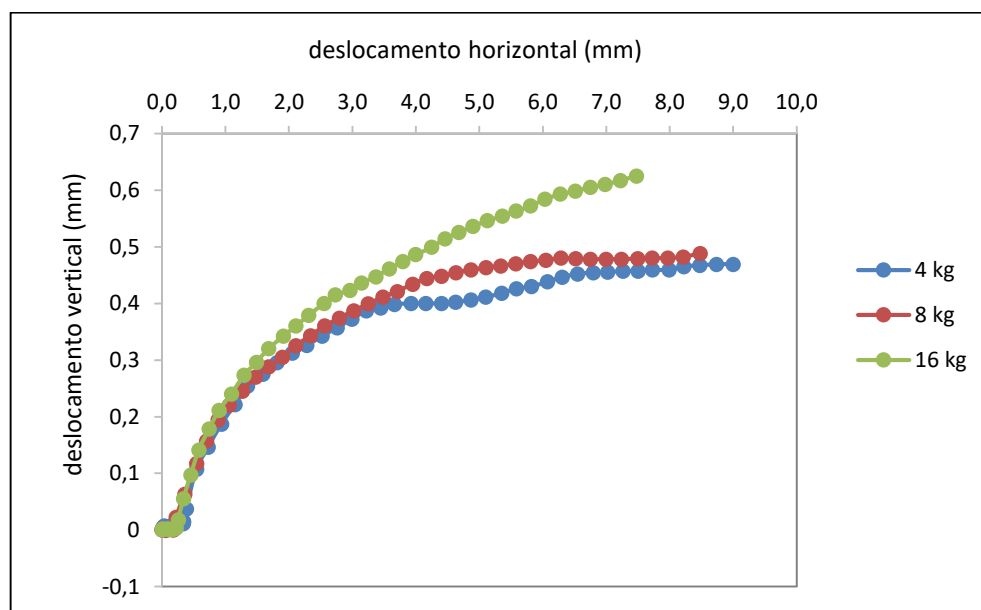


Gráfico 34. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 20°C (solo do furo 17).

Tabela 14. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 20°C (solo do furo 17).

σ (kPa)	ζ (kPa)
127,6	117,68
251,4	208,65
493,4	375,89

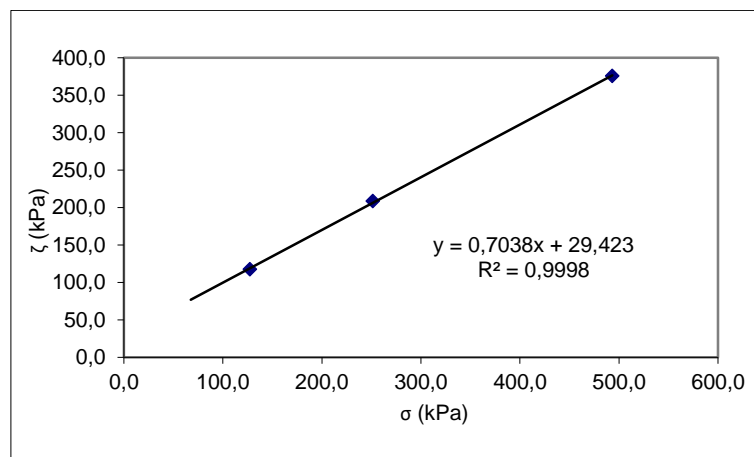


Gráfico 35. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 20°C (solo do furo 17).

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 20°C é de 29,42 kPa. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, é de 35,1°.

- Resultados com a água à temperatura de 40°C:

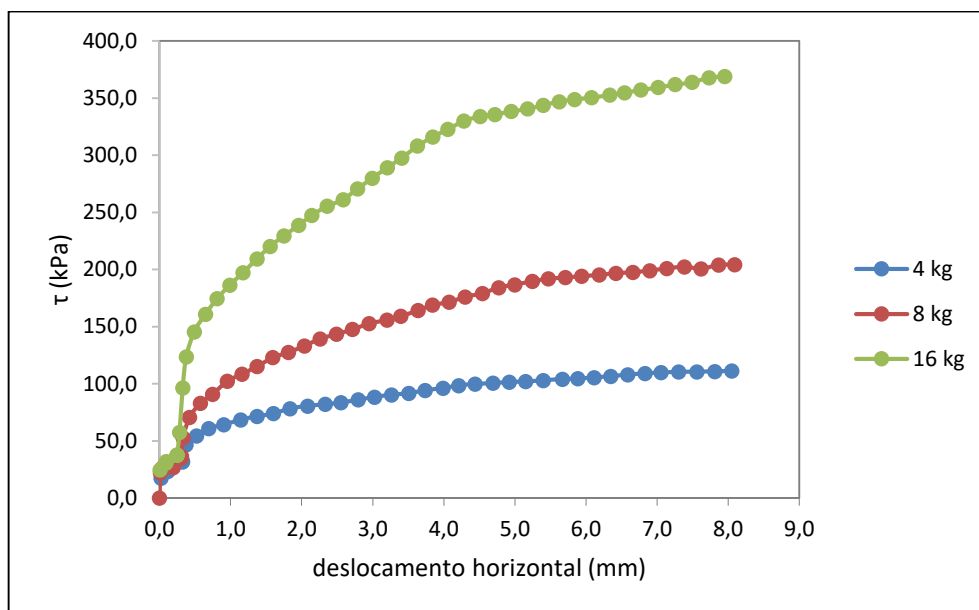


Gráfico 36. Gráfico deslocamento horizontal *versus* tensão de corte a 40°C (solo do furo 17).

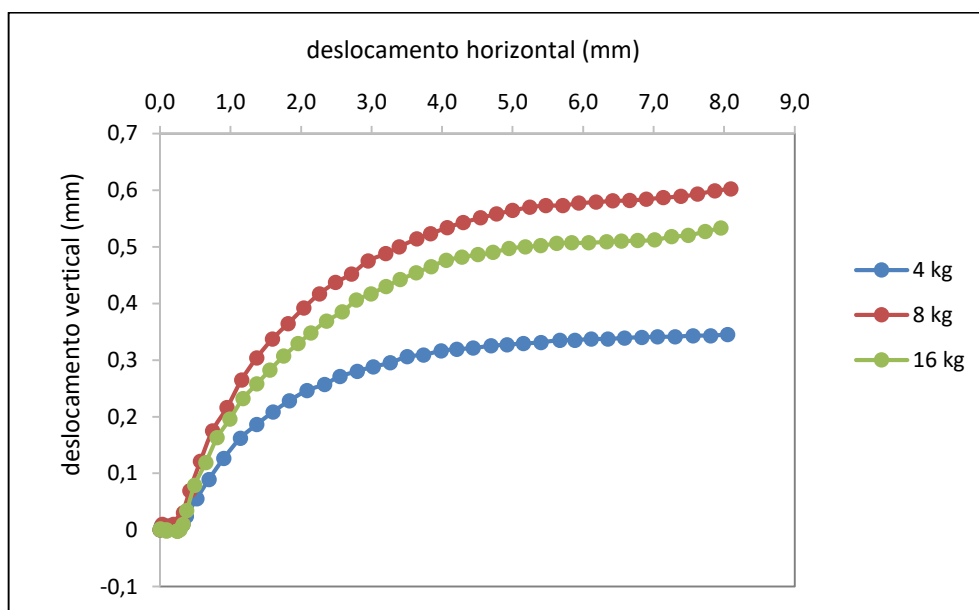


Gráfico 37. Gráfico deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical a 40°C (solo do furo 17).

Tabela 15. Valores da tensão normal e tensão de corte com a água à temperatura de 40°C (solo do furo 17).

σ (kPa)	ζ (kPa)
124,1	110,25
249,7	200,57
498,2	363,77

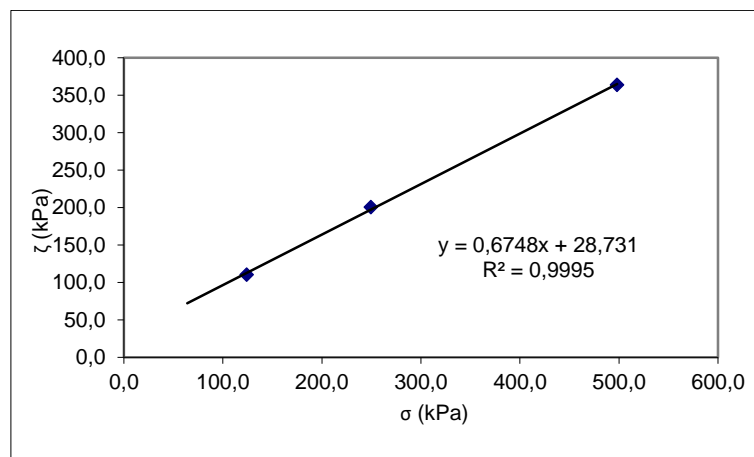


Gráfico 38. Gráfico tensão normal *versus* tensão de corte a 40°C (solo do furo 17).

Pela análise dos resultados anteriores, e tratando-se de uma areia argilosa, é possível verificar que a coesão do solo a 40°C é de 28,73 kPa. O valor do ângulo de atrito é dado pela tangente do declive da reta do gráfico das tensões, é de 34,0°.

Apresenta-se agora uma tabela em que se arredondou os valores da tensão normal para valores arredondados e através das equações dos respectivos gráficos para cada temperatura se calculou a tensão de corte e se verificou qual a percentagem de resistência que diminui entre os 20°C, temperatura ambiente, e os 10°C e 40°C.

Tabela 16. Tabela comparativa da variação da resistência em função da temperatura (solo do furo 17).

Temperatura (°C)	σ' (kPa)	ζ (kPa)	Variação da resistência (%)
10	150	132,7	-1,7
	250	205,3	0,0
	500	386,8	1,4
20	150	135,0	-
	250	205,4	-
	500	381,3	-
40	150	130,0	-3,7
	250	197,4	-3,9
	500	366,1	-4,0

Pela análise da tabela é possível verificar que para a temperatura de 10°C a resistência apenas diminui para uma tensão normal de 150 kPa e esta diminuição é de apenas cerca de 2%, não sendo por isso um valor significativo. Já para a temperatura de 40°C a resistência diminui cerca de 4%, sendo este um valor também relativamente baixo. Neste caso, a percentagem de finos perdida durante o ensaio de corte direto foi 10 vezes inferior ao furo 16. Neste caso a diminuição de resistência não é tão significativa como se verificou no furo 16 e no ensaio da areia padrão. Posto isto, a perda de finos resultante do ensaio de corte do furo 16 e a ausência de finos no ensaio de areia, tiveram influência no resultado final e por consequência uma alteração significativa na resistência do solo e de seguida apresenta-se um gráfico resumo das retas de resistência ao corte obtidas

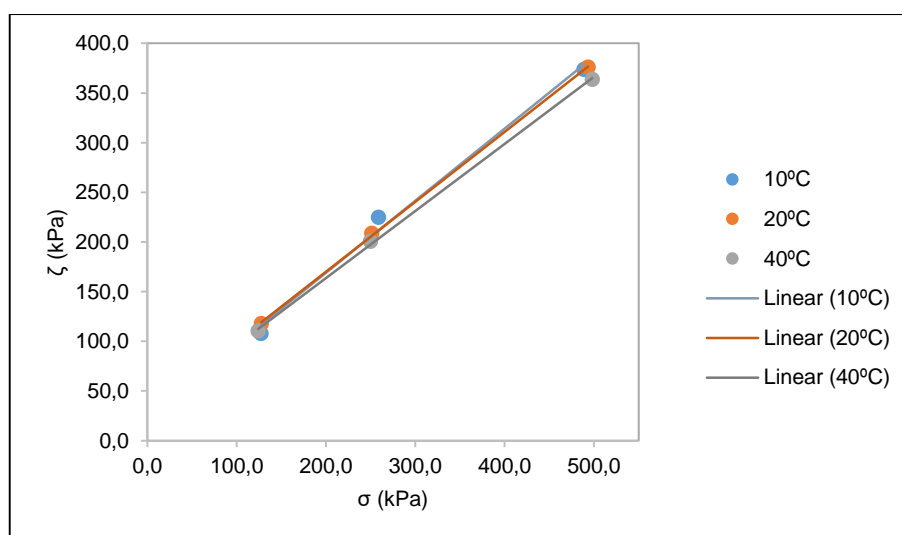


Gráfico 39. Gráfico resumo das retas de resistência ao corte (solo do furo 17).

Pela análise do gráfico anterior é possível verificar que as 3 retas são quase coincidentes, ou seja, os valores de resistência para as 3 temperaturas são semelhantes, sendo este resultado expectável de acordo com os valores das percentagens de resistência que se registaram na Tabela 16.

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1. Conclusões

Neste capítulo, será apresentado um resumo de todo o trabalho desenvolvido durante esta dissertação, indicando as principais conclusões que se obtiveram ao longo deste estudo.

Este trabalho teve como principal objetivo realizar um estudo de caracterização mecânica sob efeito de temperatura de 2 solos com características físicas semelhantes. Estes solos foram retirados de furos onde foram posteriormente instalados sistemas geotérmicos, para climatização de um edifício no Campus Santiago na Universidade de Aveiro. Em primeiro lugar, foi apresentada uma breve explicação do estudo em causa e a zona de estudo do mesmo e posteriormente os diferentes tipos de sistemas geotérmicos e seu funcionamento. Fez-se também uma breve explicação de vários ensaios para caracterização térmica de solos, apesar de que não se realizaram quaisquer ensaios desta natureza. De seguida apresentou-se todos os ensaios de caracterização física elaborados em laboratório e as respetivas normas utilizadas. Apresentou-se também o ensaio de caracterização mecânica utilizado para o estudo, ensaio de corte direto, e as respetivas alterações que se efetuaram no mesmo para responder às necessidades do estudo.

Prosseguiu-se com a descrição da metodologia efetuada em todos os ensaios e por fim, apresentou-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica sob efeito de temperatura.

Através dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica é possível verificar que a resistência mecânica do solo diminui em função da temperatura. Verifica-se que existe uma diminuição tanto do ângulo de atrito como da coesão em ambos os solos ensaiados. Apesar de se verificar uma diminuição na maioria dos casos, esta diminuição não apresenta um padrão claro, portanto não se pode definir qual a percentagem de resistência que diminui para cada temperatura.

A diminuição de resistência nos 2 furos e no ensaio da areia padrão não é igual, o que leva a concluir que há uma influência significativa da granulometria. Importa também referir que a amostra de areia é preparada em laboratório não tendo sido efetuado um controlo rigoroso da compactidade o que pode também ter tido influência nos resultados. Verificou-se que no solo analisado proveniente do furo 16 (areia argilosa) e no ensaio da areia padrão a resistência diminui significativamente quando a água está à temperatura de 40°C, em cerca de

20% a 25%, mas esta tendência não se verifica no solo analisado proveniente do furo 17 (areia argilosa), em que esta diminuição andou próxima dos 4%. Já para a temperatura de 10°C a diminuição da resistência não foi muito significativa e variou, considerando todos os ensaios efetuados, entre os 0% e 8%.

Tendo os ensaios sido realizados sob as mesmas condições e sendo as características físicas dos solos dos furos semelhantes, seria de esperar que os resultados obtidos fossem também semelhantes, no entanto tal não se verificou. Uma possível hipótese para explicar este comportamento é a de que a percentagem de finos presente no solo influencia diretamente a resistência ao corte do mesmo, e a perda de finos observada no ensaio a temperatura mais elevada teve um efeito importante. Isto justifica a diferença de resistência entre o solo ensaiado proveniente do furo 16, o ensaio da areia padrão e o do solo ensaiado do furo 17. No caso da areia, esta não apresenta qualquer tipo de fração argilosa, enquanto o solo do furo 16 perdeu durante os ensaios uma quantidade significativa de percentagem de argila, o que não se verificou no solo do furo 17. Esta percentagem de argila inexistente ou perdida influenciou diretamente os resultados para uma temperatura de 40°C, pois um aumento da temperatura no solo faz com que as partículas se expandam, como houve uma diminuição da percentagem de finos no solo, todos estes fatores influenciaram, verificando-se assim uma diminuição da resistência do mesmo. Já à temperatura de 10°C não se verificou uma diminuição significativa da resistência em nenhum dos casos. Assim, a temperatura mais crítica e que poderá apresentar influência mais significativa na resistência do solo será a de 40°C, ou seja quando os sistemas geotérmicos se encontram a trabalhar durante o Verão e têm de dissipar calor no solo.

No que diz respeito à coesão, verificou-se para 40°C uma diminuição em ambos os furos em relação à temperatura de 20°C (temperatura ambiente). O ângulo de atrito apresenta uma ligeira diminuição quando se aumenta a temperatura para 40°C, como seria de esperar tendo em conta os resultados de resistência. No entanto, para a temperatura de 10°C apenas no solo proveniente do furo 16 este valor diminui (cerca de 4%) em relação ao valor obtido a 20°C. Seria necessário realizar mais ensaios ou então utilizar um ensaio em que os resultados obtidos fossem mais fiáveis, propondo-se para o efeito o recurso ao ensaio triaxial.

Os ensaios realizados nesta dissertação foram em parte condicionados por fatores relacionados com o aparelho de corte direto, pois não havia sistema de aquisição de dados automático e todas as leituras foram efetuadas manualmente através de defletómetros digitais. Idealmente os ensaios teriam de ser efetuado com um controlo sobre o estado de compactação, no caso da areia, e evitar a perda de finos nos ensaios do solo do furo 17. Este e outros

problemas encontrados ao longo do trabalho prático condicionaram o prazo de finalização dos ensaios e serviram de aprendizagem futura. Assim, o trabalho em laboratório tem as suas vantagens pois permite um conhecimento mais abrangente e prático do tema, bem como, a aprendizagem com manuseamento de material laboratorial. Em contrapartida os obstáculos que se podem encontrar são muitos e por vezes as coisas não correm bem e é necessário recomeçar de novo. Em suma, o trabalho laboratorial é ótimo para aquisição de conhecimento de componentes mais práticas, que nem sempre são possíveis de realizar ao longo do curso, mas tem as suas desvantagens que também servem de aquisição de conhecimentos para enfrentar as dificuldades que poderão surgir em trabalhos futuros.

5.2.Perspetivas futuras

Ao concluir esta dissertação foi possível identificar alguns pontos importantes que devem futuramente ser estudados mais aprofundadamente, de modo a ser possível confirmar a existência ou não de um padrão de variação em que há uma diminuição da resistência em cada tipo de solo consoante a variação da temperatura. Esta necessidade advém de ter claramente comprovado esse comportamento com a realização deste trabalho.

Apenas foram efetuados ensaios de corte direto a 2 solos, havendo muitos mais para serem analisados. No futuro, seria importante efetuar este estudo com recurso a ensaios triaxiais, pois estes permitem controlar a tensão aplicada na amostra e permitem ainda efetuar o ensaio em condições drenadas e não drenadas. Este ensaio permite caracterizar adequadamente o estado de tensão do solo e por consequência avaliar de forma mais rigorosa a resistência do solo.

Seria também importante alargar este estudo a vários tipos de solos, nomeadamente solos argilosos. Para isto é importante que as amostras obtidas no terreno sejam de melhor qualidade e que a quantidade das amostras seja superior para ser possível proceder a uma caracterização total e mais detalhada

Será relevante verificar qual o efeito que a temperatura tem nas partículas mais finas do solo, uma vez que com este trabalho constatou-se uma tendência para aumentar a influência da temperatura na resistência do solo com a diminuição da percentagem de partículas finas presentes no solo. Realizar este tipo de ensaios para várias percentagens de argila num solo, permitirá verificar como se altera a sua resistência com a variação da temperatura.

Por fim, é importante que se efetuem ensaios de caracterização térmica dos solos para determinar a condutibilidade do mesmo e a partir daí verificar qual a influência deste parâmetro na resistência do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abuel- Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., & Pender, M. J. (2009). Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements. *Engineering Geology*, 105(3-4), 211–219. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.008>

Antics, M., Bertani, R., e Sanner, B. (2013). Summary of EGC 2013 country update reports on geothermal energy in Europe. In *European Geothermal Congress 2013* (pp. 1–18). Pisa.

ASTM C 177-10. (2010). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*

ASTM C 518-10. (2010). *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*

ASTM D 2487-85. (1985). *Standard test method for classification of soils for engineering purposes*

ASTM D 3080-90. (1990). *Standard test method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*

ASTM D 5334-05. (2005). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*

ASTM E 1225-09. (2009). *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded- Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique*

Barry-Macaulay, D., Bouazza, a., Singh, R. M., Wang, B., & Ranjith, P. G. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131–138. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.014>

Becker, B. R., Misra, A., & Fricke, B. a. (1992). Development of correlations for soil thermal conductivity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 19(1), 59–68. [http://doi.org/10.1016/0735-1933\(92\)90064-O](http://doi.org/10.1016/0735-1933(92)90064-O)

Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and Mass Transfer/Waerme-Und Stoffuebertragung*, 44(10), 1241–1246. <http://doi.org/10.1007/s00231-007-0357-1>

Fernandes, M. M. (2011). *Mecânica dos Solos* (2ª Edição). FEUP edições.

Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2495–2504. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.02.008

ISO/TS 17892-1. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content*

ISO/TS 17892-2. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 2: Determination of density of fine-grained soil*

ISO/TS 17892-3. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density - Pycnometer method*

ISO/TS 17892-4. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution*

ISO/TS 17892-12. (2004). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits*

Moel, M., Bach, P., Bouazza, A., Singh, R., e Sun, J. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2683–2696. doi:10.1016/j.rser.2010.07.027

Lopes, H. L. dos S. (2014). Henrique Lopes dos Santos Lopes. Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia Estudos de Caracterização Térmica Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia Estudos de Caracterização Térmica Henrique Lopes dos Santos Lopes.

Low, J. E., Loveridge, F. A., Powrie, W., & Nicholson, D. (2015). RESEARCH PAPER A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications, 209–218. <http://doi.org/10.1007/s11440-014-0333-0>

Paristech, P., Minh, A., Paristech, P., Paristech, P., & Paristech, P. (2016). Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*.

Powrie, W., e Preene, M. (2009). Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Géotechnique*, 59(3), 261–271. doi:10.1680/geot.2009.59.3.261

<https://www.uponor.pt/soluciones/geotermia.aspx> (acedido a 09/11/2016)

<http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/> (acedido a 09/11/2016)

ANEXO 1

Tabela de Classificação Unificada de solos.

Critérios para designação dos símbolos e nome dos grupos utilizando ensaios de laboratório (a)				Classificação do solo		
				Símbolo do grupo	Nome do grupo (b)	
SOLOS GROSSOS	Cascalho mais de 50% da fração grossa retida no peneiro n.º 200	Cascalhos limpos (c)	$C_U \geq 4$ e $1 \leq C_C \leq 3$ (e)	GW	Cascalho bem graduado (f)	
		Menos de 5% de finos	$C_U < 4$ e/ou $C_C < 1$ e/ou $C_C > 3$ (e)	GP	Cascalho mal graduado (f)	
		Cascalhos com finos (c)	Finos classificados como ML ou MH	GM	Cascalho siltoso (f), (g), (h)	
		Mais de 12% de finos	Finos classificados como CL ou CH	GC	Cascalho argiloso (f), (g), (h)	
	Areias 50% ou mais da fração grossa passada no peneiro n.º 4	Areias limpas (d)	$C_U \geq 6$ e $1 \leq C_C \leq 3$ (e)	SW	Areia bem graduada (i)	
		Menos de 5% de finos	$C_U < 6$ e/ou $C_C < 1$ e/ou $C_C > 3$ (e)	SP	Areia mal graduada (i)	
		Areias com finos (d)	Finos classificados como ML ou MH	SM	Areia siltosa (g), (h), (i)	
		Mais de 12% de finos	Finos classificados como CL ou CH	SC	Areia argilosa (g), (h), (i)	
	SOLOS FINOS	Siltes e argilas	Inorgânico	$I_P > 7$ e situa-se na linha A ou acima desta (j)	CL	Argila magra (k), (l), (m)
				$I_P < 4$ ou situa-se abaixo da linha A (j)	ML	Silte (k), (l), (m)
		Orgânico	$\frac{w_L \text{ (seco em estufa)}}{w_L \text{ (sem secagem)}} < 0,75$	OL	Argila orgânica (k), (l), (m), (n) Silte orgânico (k), (l), (m), (o)	
Siltes e argilas		Inorgânico	I_P situa-se na linha A ou acima desta	CH	Argila gorda (k), (l), (m)	
			I_P situa-se abaixo da linha A	MH	Silte elástico (k), (l), (m)	
		Orgânico	$\frac{w_L \text{ (seco em estufa)}}{w_L \text{ (sem secagem)}} < 0,75$	OH	Argila orgânica (k), (l), (m), (p) Silte orgânico (k), (l), (m), (q)	
Solos altamente orgânicos, principalmente matéria orgânica, cor escura e odor orgânico				Pt	Turfa	

- (a) Baseado no material passado no peneiro 3" (75 mm).
- (b) Se a amostra virgem tiver blocos e/ou calhaus junte "com blocos e/ou calhaus" ao nome do grupo.
- (c) Cascalho com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos: GW – GM Cascalho bem graduado com silte; GW – GC Cascalho bem graduado com argila; GP – GM Cascalho mal graduado com silte; GP – GC Cascalho mal graduado com argila.
- (d) Areia com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos: SW – SM Areia bem graduada com argila; SP – SM Areia mal graduada com silte; SP – SC Areia mal graduada com argila.
- (e) $C_U = D_{60}/D_{10}$; $C_C = (D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$
- (f) Se o solo contém $\geq 15\%$ de areia, junte "com areia" ao nome do grupo.
- (g) Se os finos se classificam como CL – ML, use dois símbolos: GC – GM, SC – SM.
- (h) Se os finos são orgânicos, junte "com finos orgânicos" ao nome do grupo.
- (i) Se o solo contém $\geq 15\%$ de cascalho, junte "com cascalho" ao nome do grupo.
- (j) Se os limites de Atterberg se situam na zona sombreada da carta de plasticidade, o solo é um CL – ML, argila siltosa.
- (k) Se o solo contém 15 a 30% retido no peneiro n.º 200, junte "com areia" ou "com cascalho" conforme o predominante.
- (l) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente arenoso, junte "arenoso" ao nome do grupo.
- (m) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente cascalho, junte "cascalhento" ao nome do grupo.
- (n) $I_P \geq 4$ e situa-se na linha A ou acima desta.
- (o) $I_P < 4$ ou situa-se abaixo da linha A.
- (p) I_P situa-se na linha A ou acima desta.
- (q) I_P situa-se abaixo da linha A.

ANEXO 2

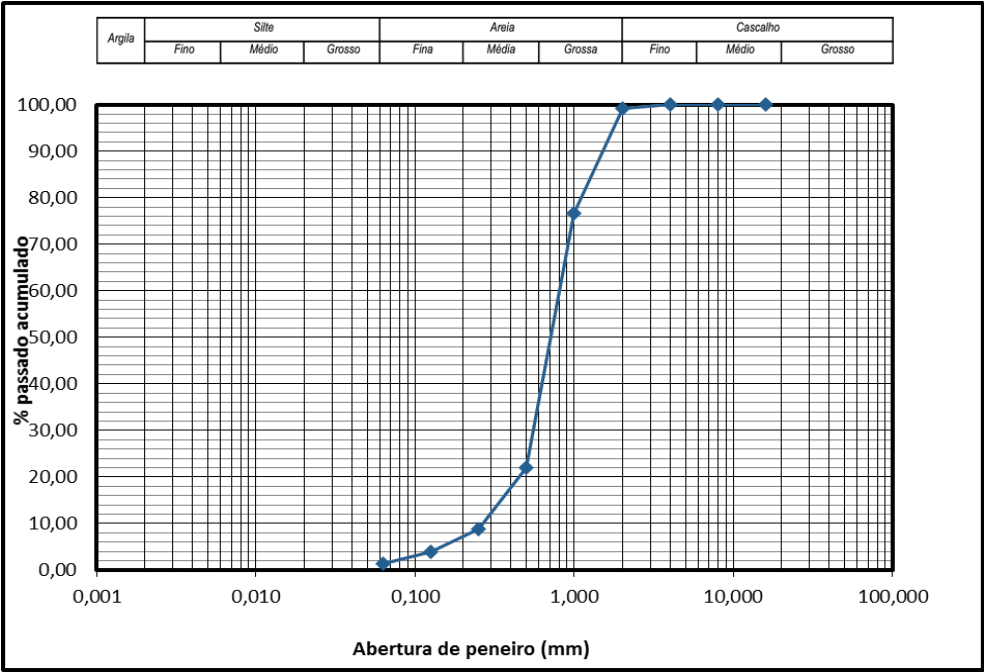


Gráfico 40. Distribuição granulométrica da amostra dos 120 aos 126 metros (sem lavagem).

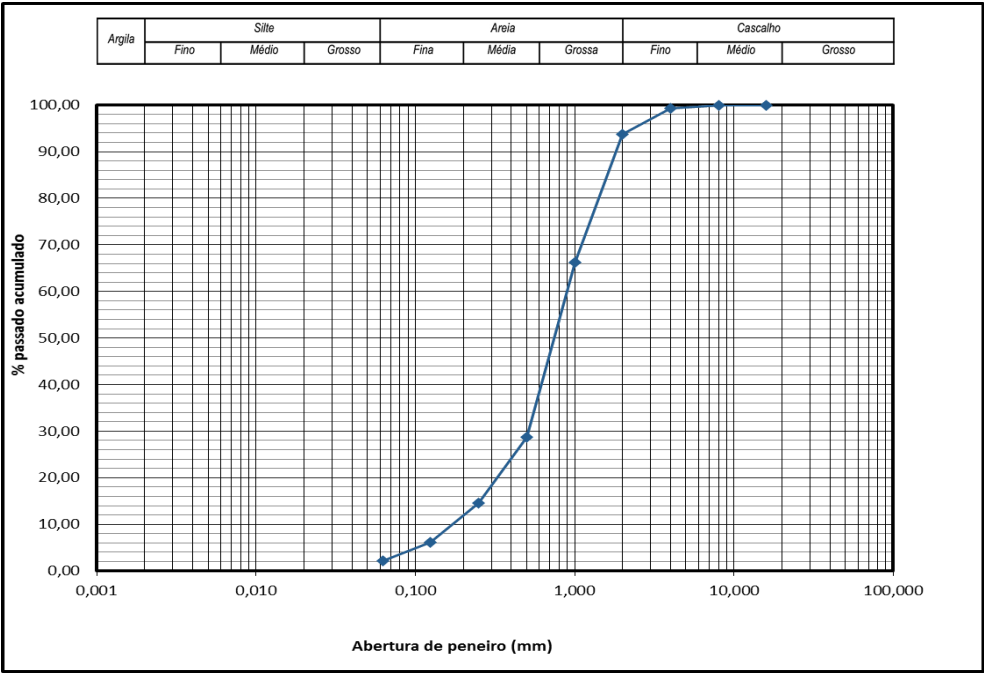


Gráfico 41. Distribuição granulométrica da amostra dos 108 aos 114 metros (sem lavagem).

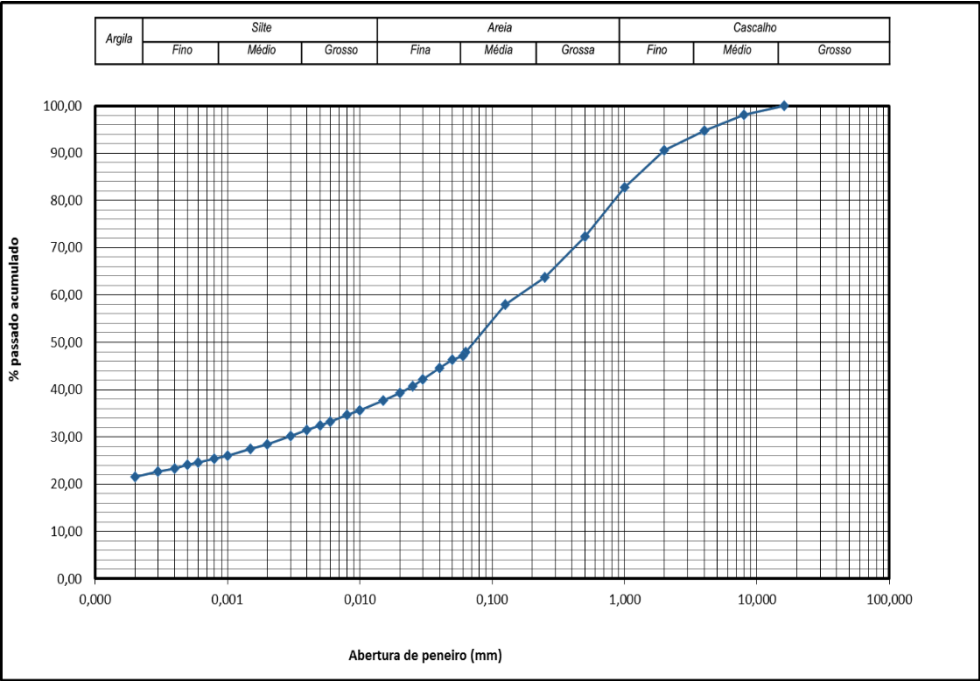


Gráfico 42. Distribuição granulométrica da amostra dos 0 aos 6 metros.

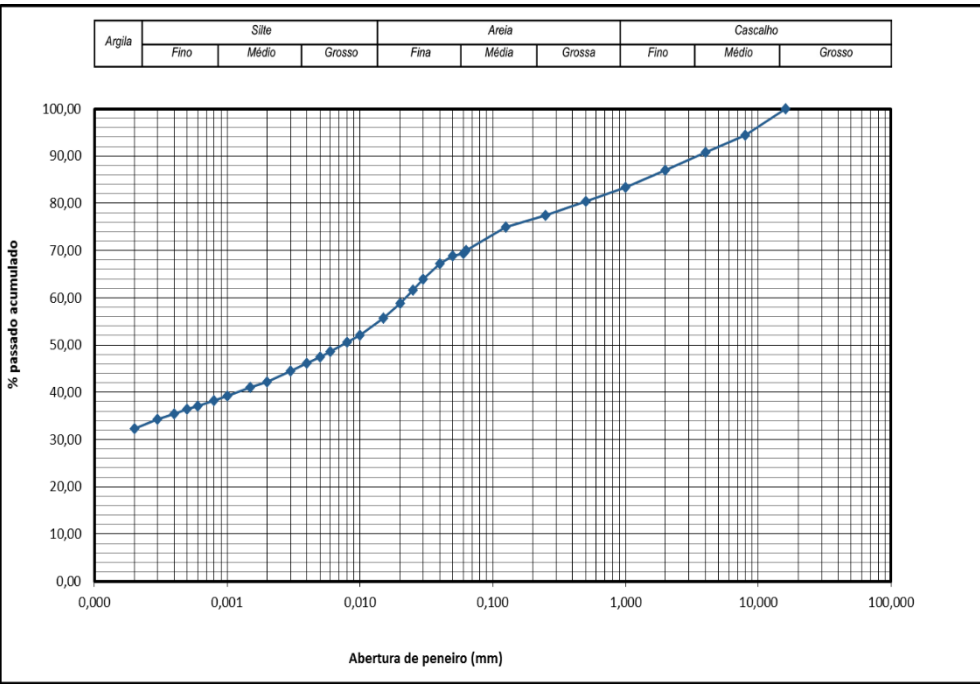


Gráfico 43. Distribuição granulométrica da amostra dos 6 aos 12 metros.

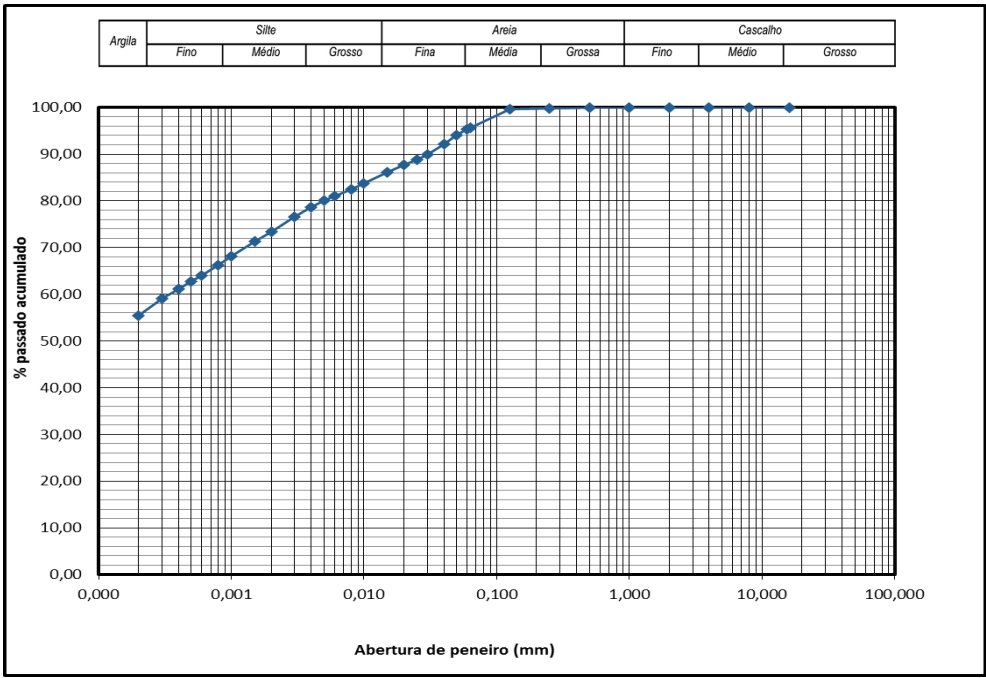


Gráfico 44. Distribuição granulométrica da amostra dos 12 aos 18 metros.

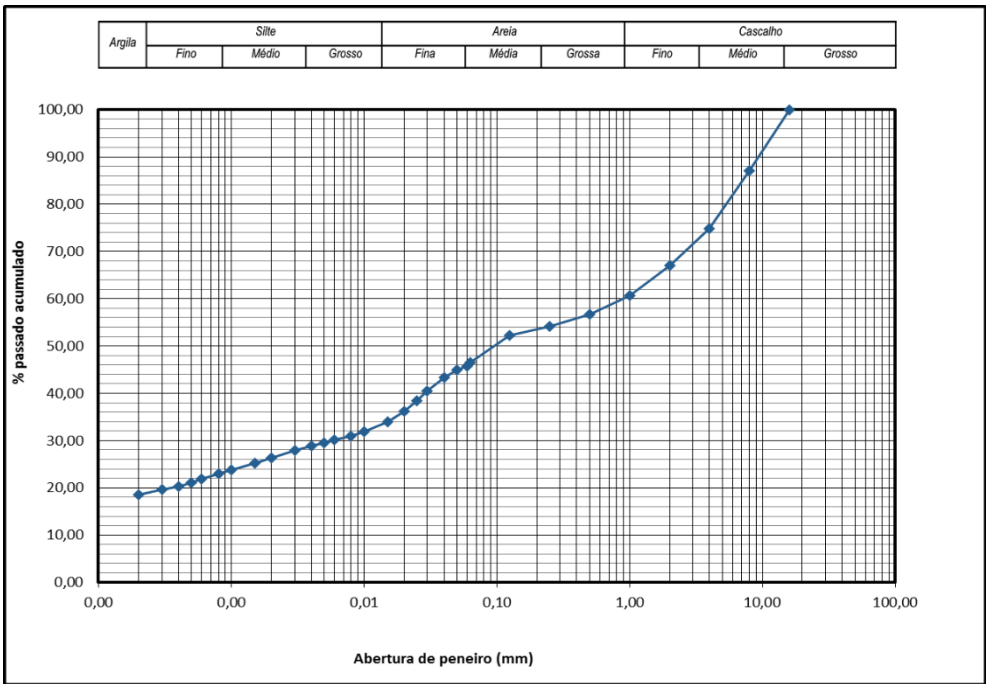


Gráfico 45. Distribuição granulométrica da amostra dos 18 aos 24 metros.

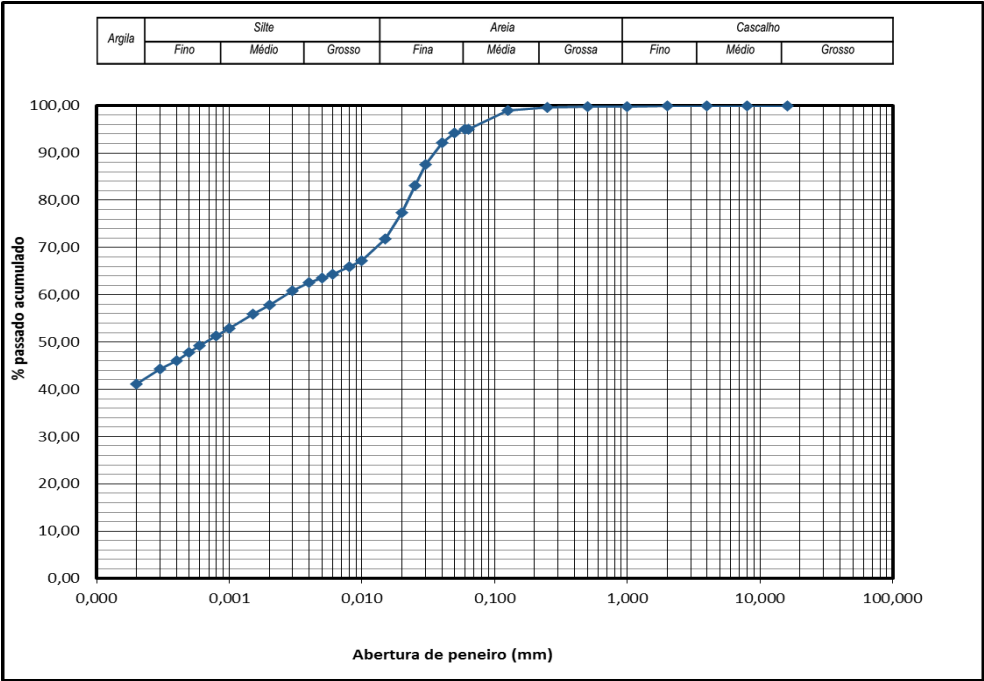


Gráfico 46. Distribuição granulométrica da amostra dos 24 aos 30 metros.

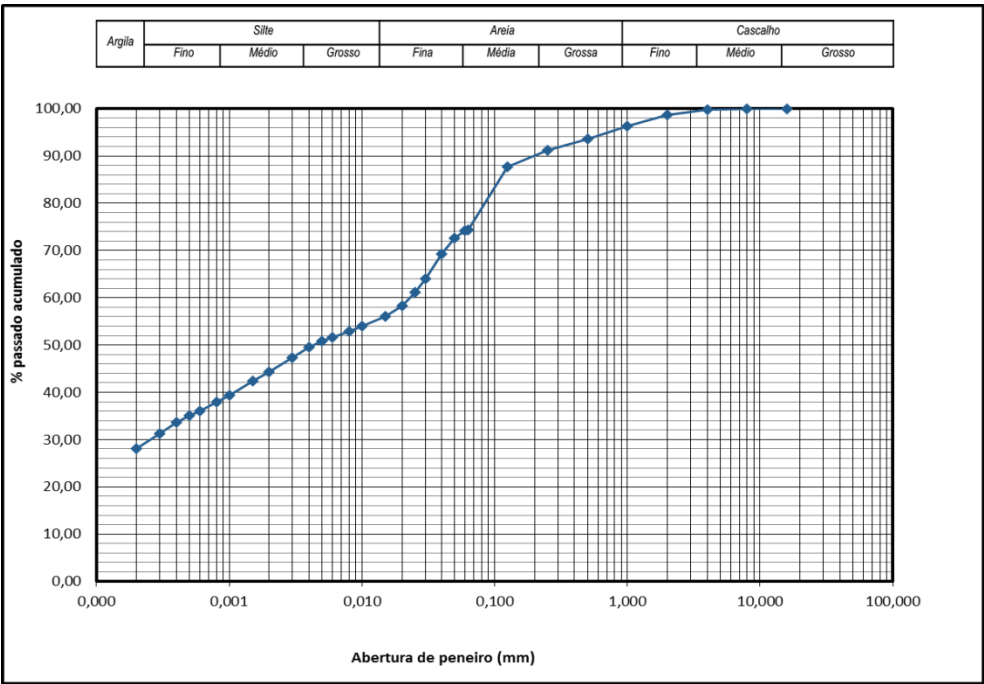


Gráfico 47. Distribuição granulométrica da amostra dos 30 aos 36 metros.

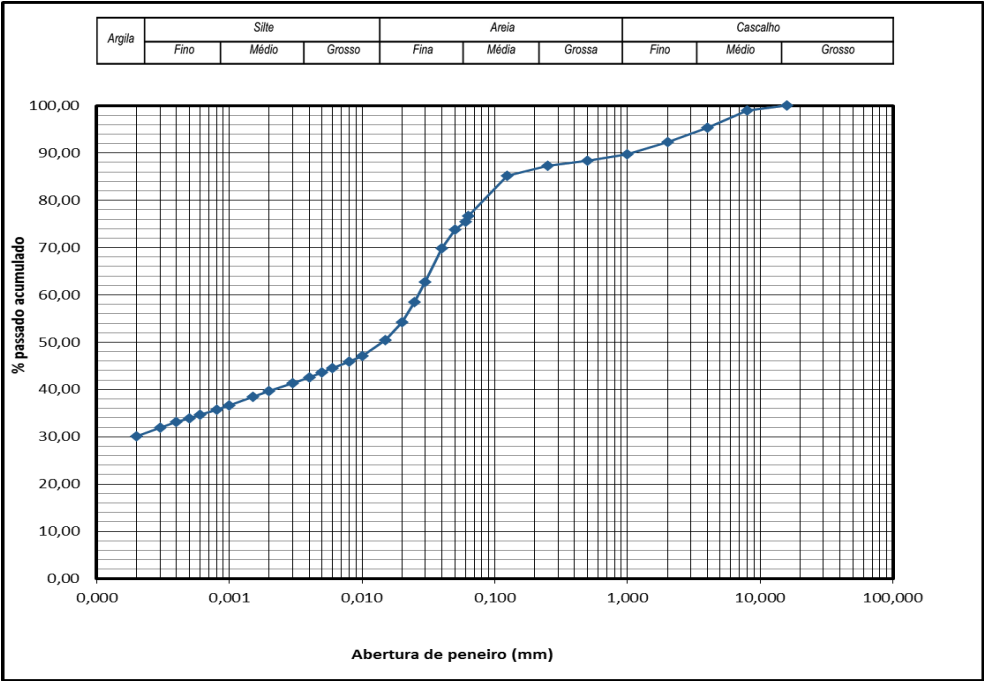


Gráfico 48. Distribuição granulométrica da amostra dos 36 aos 42 metros.

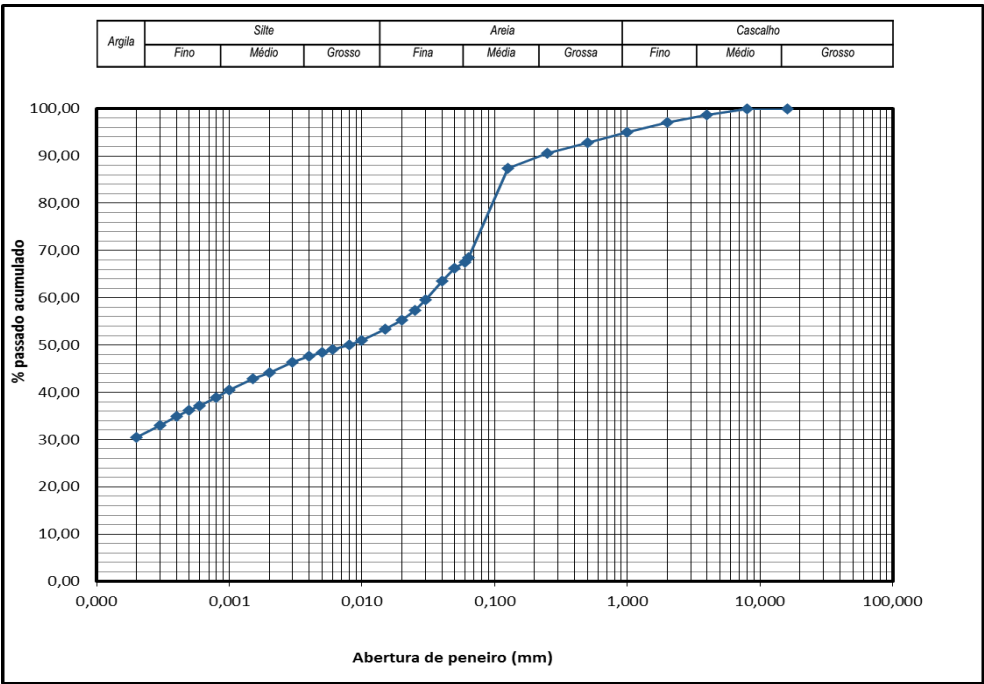


Gráfico 49. Distribuição granulométrica da amostra dos 42 aos 48 metros.

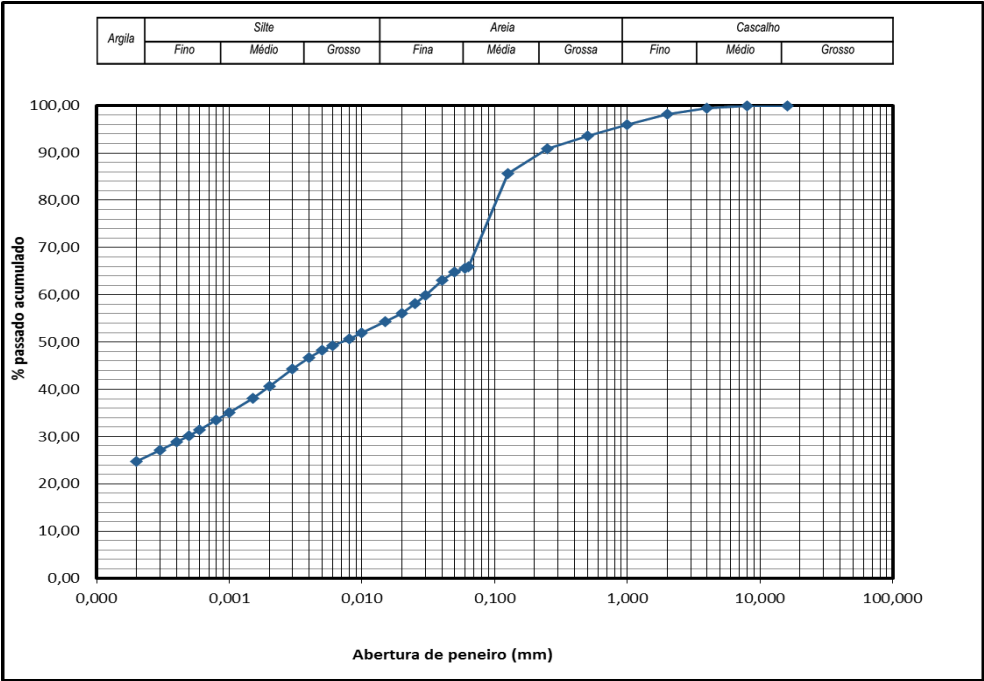


Gráfico 50. Distribuição granulométrica da amostra dos 48 aos 54 metros.

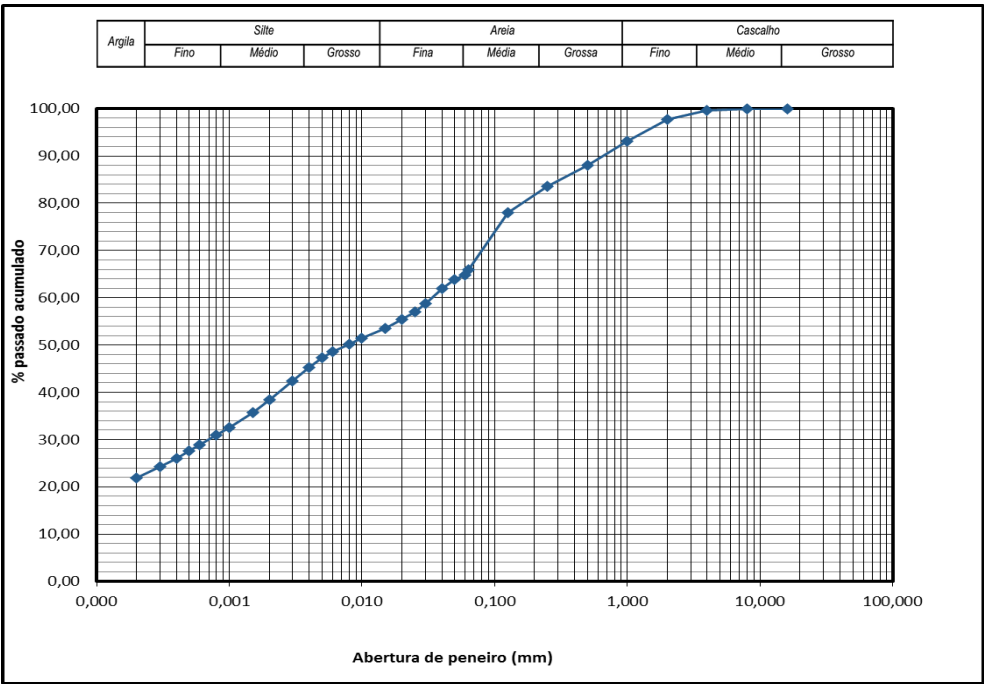


Gráfico 51. Distribuição granulométrica da amostra dos 54 aos 60 metros.

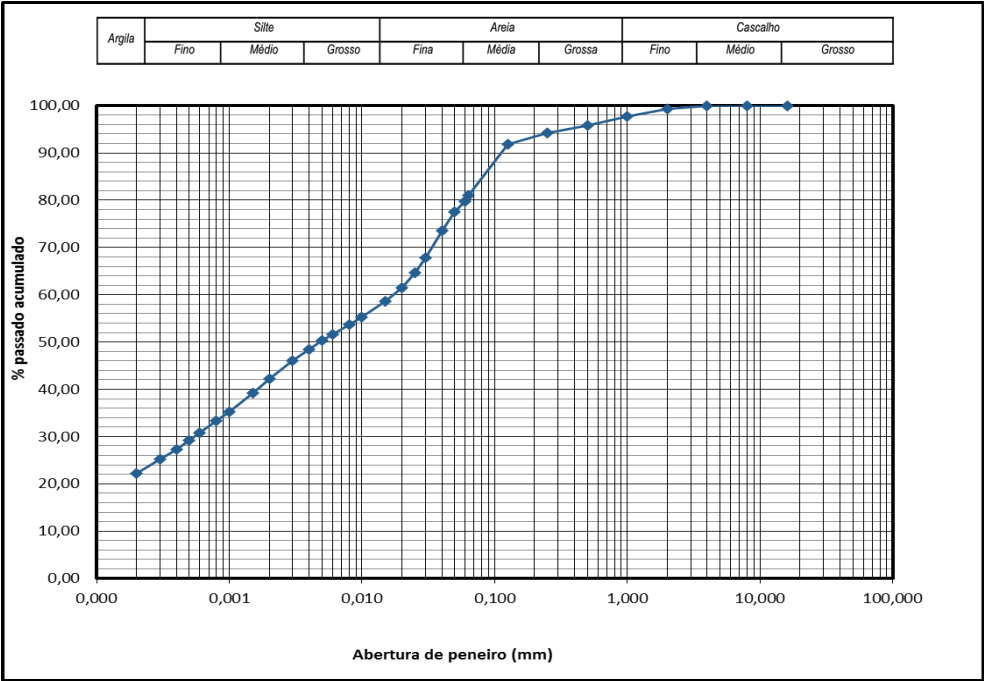


Gráfico 52. Distribuição granulométrica da amostra dos 60 aos 66 metros.

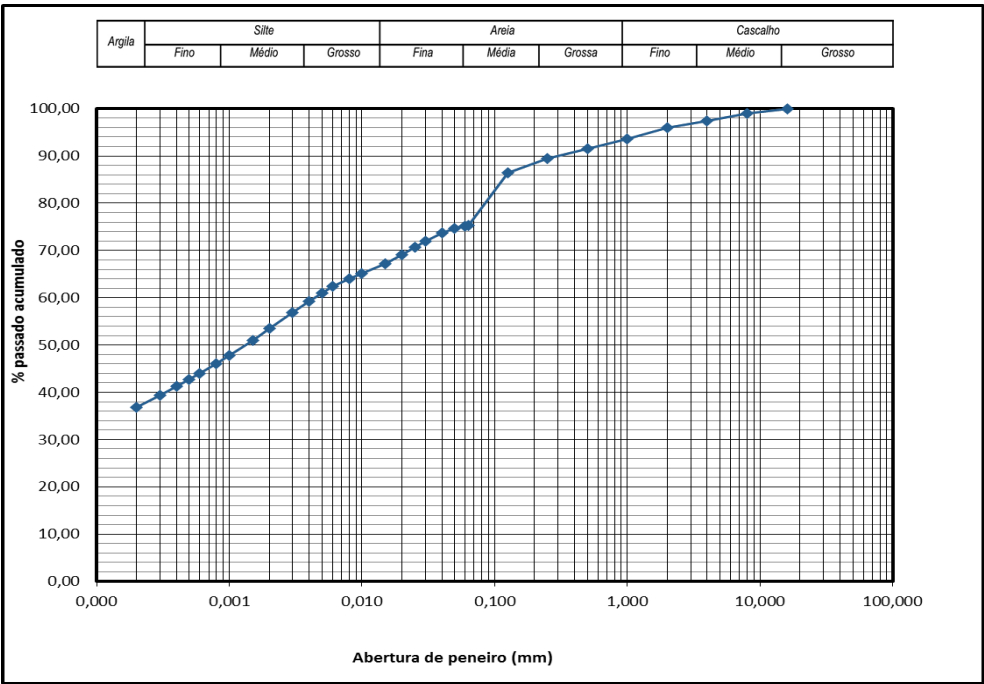


Gráfico 53. Distribuição granulométrica da amostra dos 66 aos 72 metros.

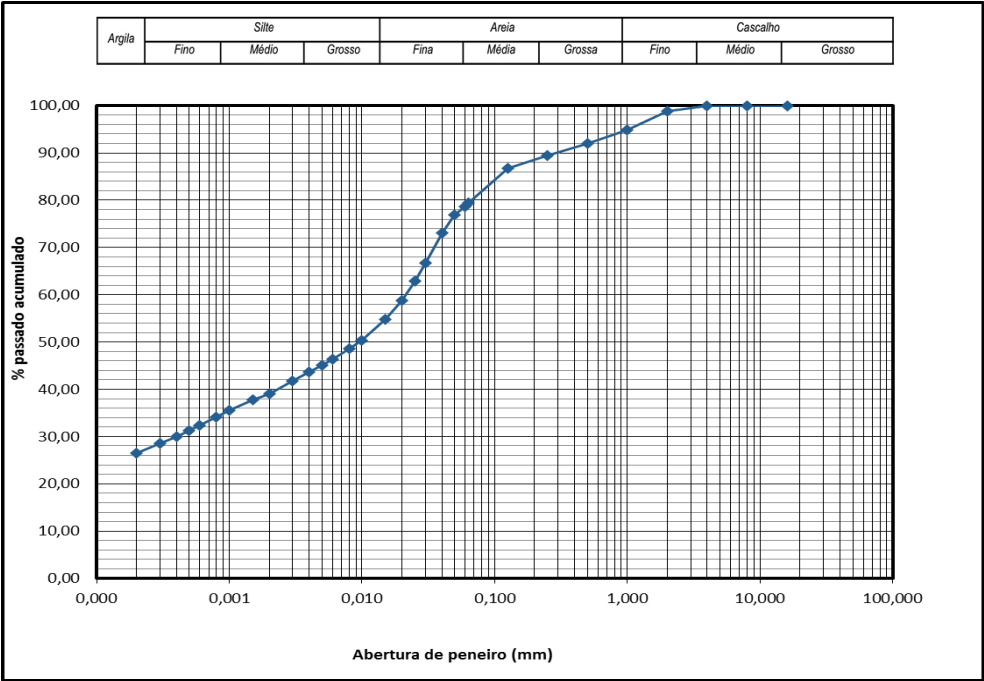


Gráfico 54. Distribuição granulométrica da amostra dos 72 aos 78 metros.

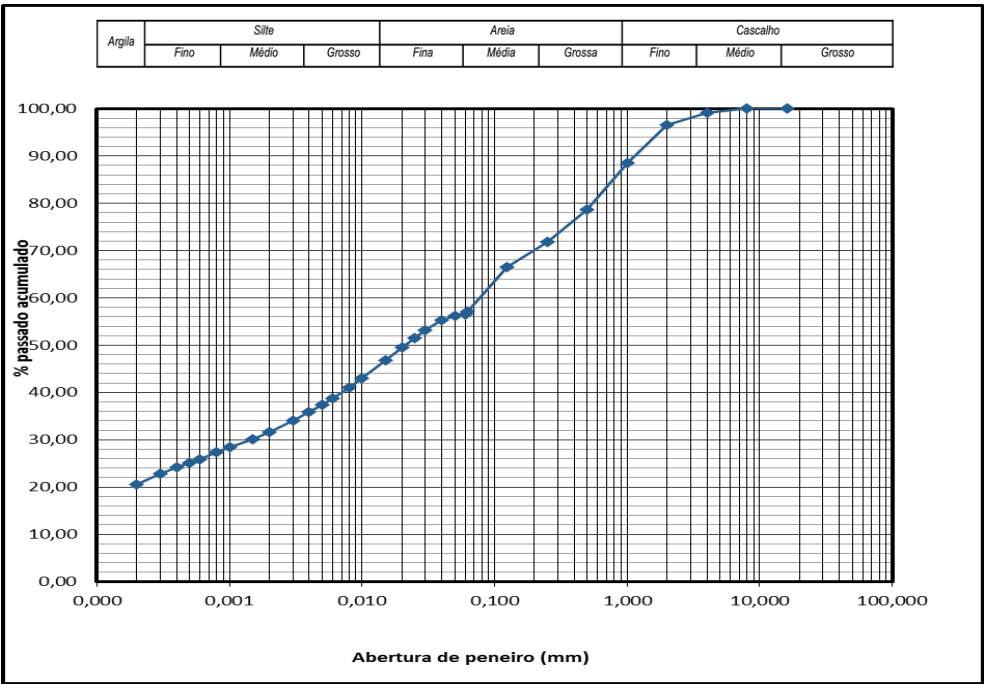


Gráfico 55. Distribuição granulométrica da amostra dos 84 aos 90 metros.

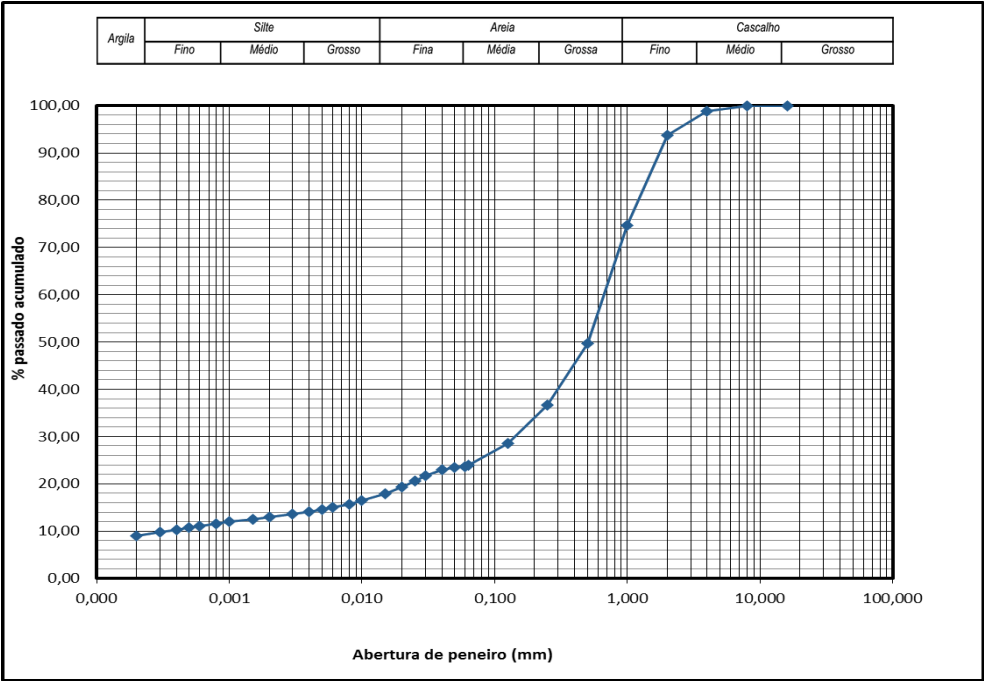


Gráfico 56. Distribuição granulométrica da amostra dos 90 aos 96 metros.

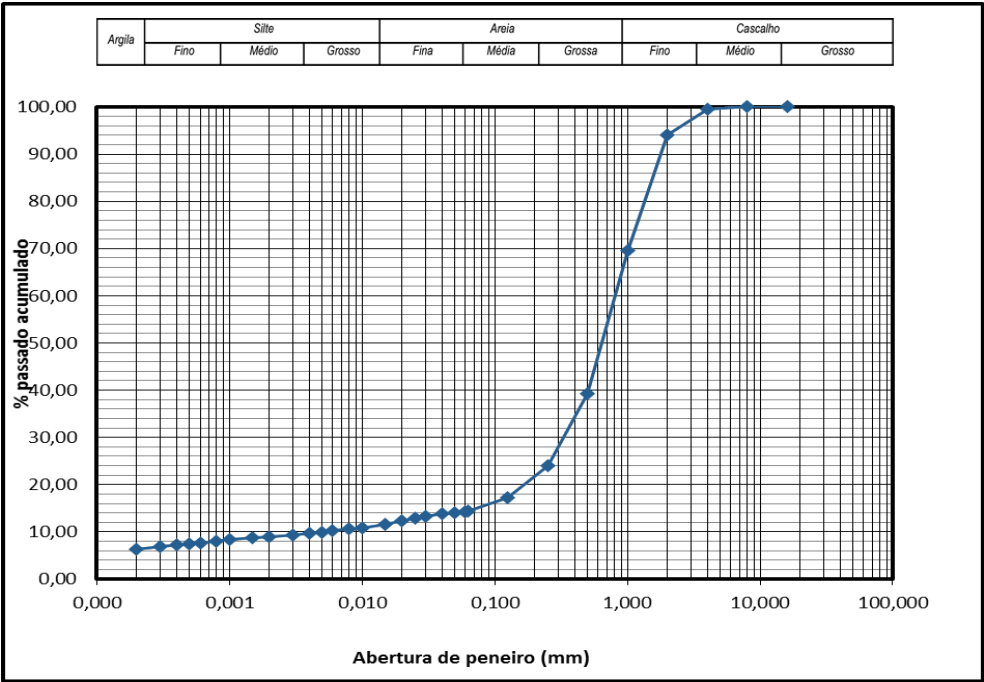


Gráfico 57. Distribuição granulométrica da amostra dos 96 aos 102 metros.

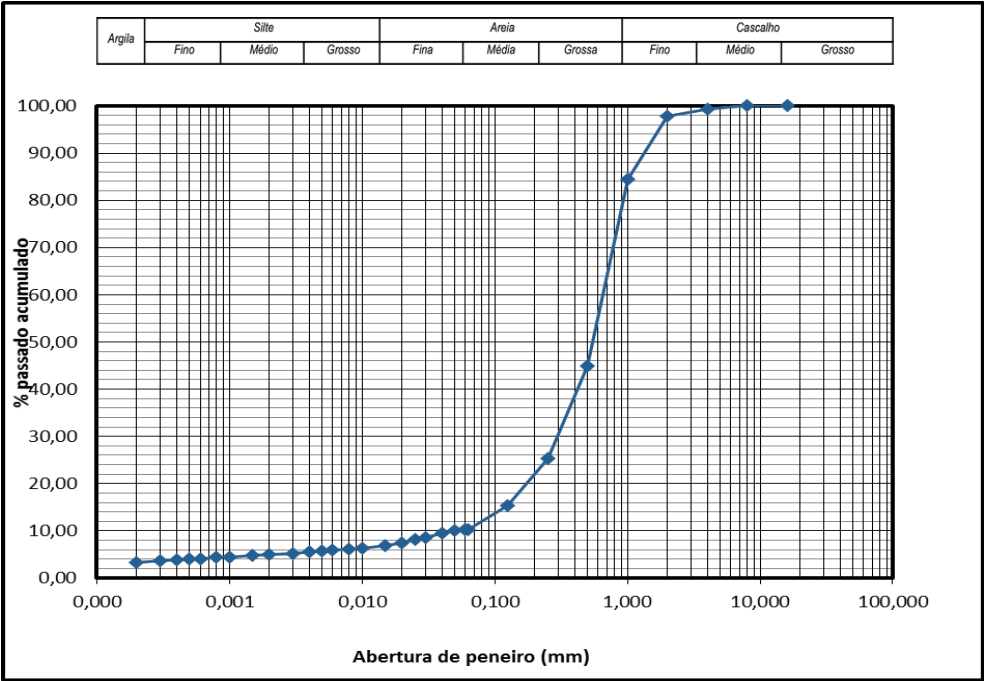


Gráfico 58. Distribuição granulométrica da amostra dos 102 aos 108 metros.

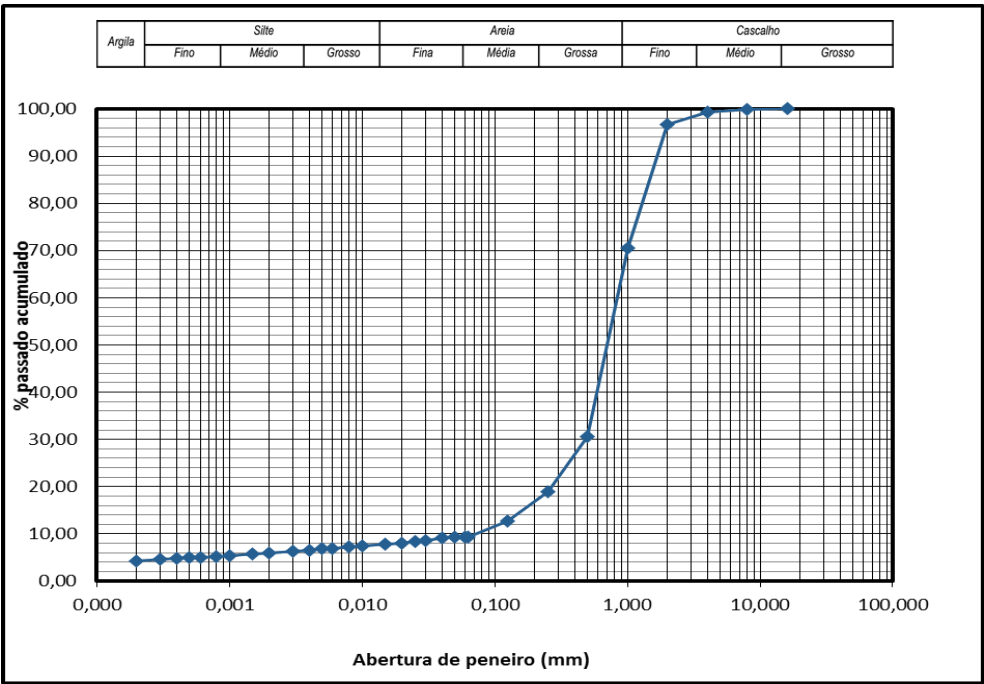


Gráfico 59. Distribuição granulométrica da amostra dos 114 aos 120 metros.

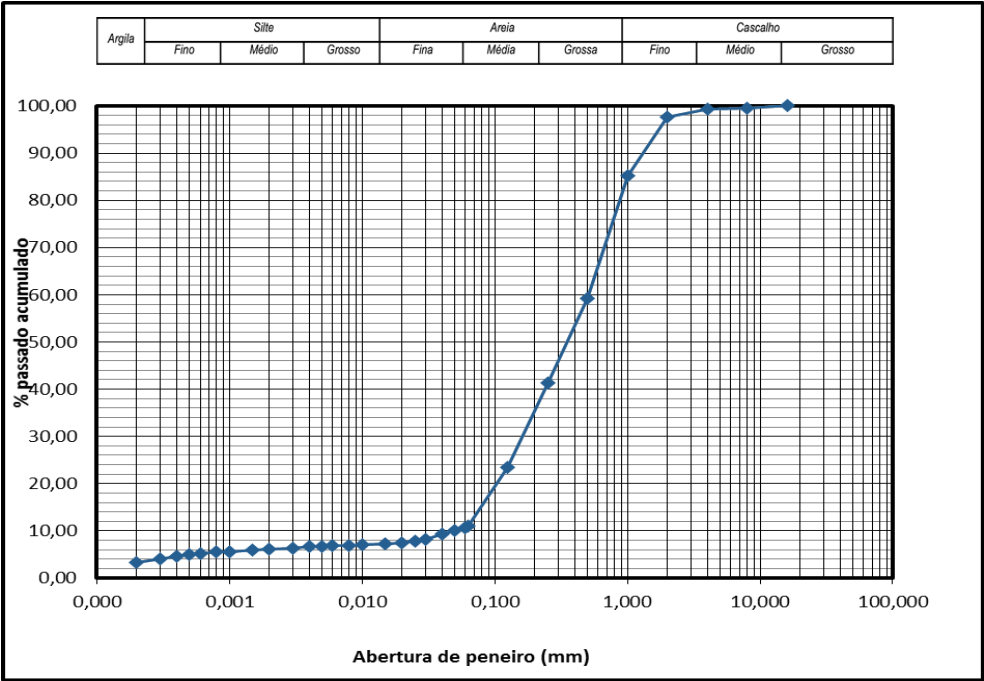
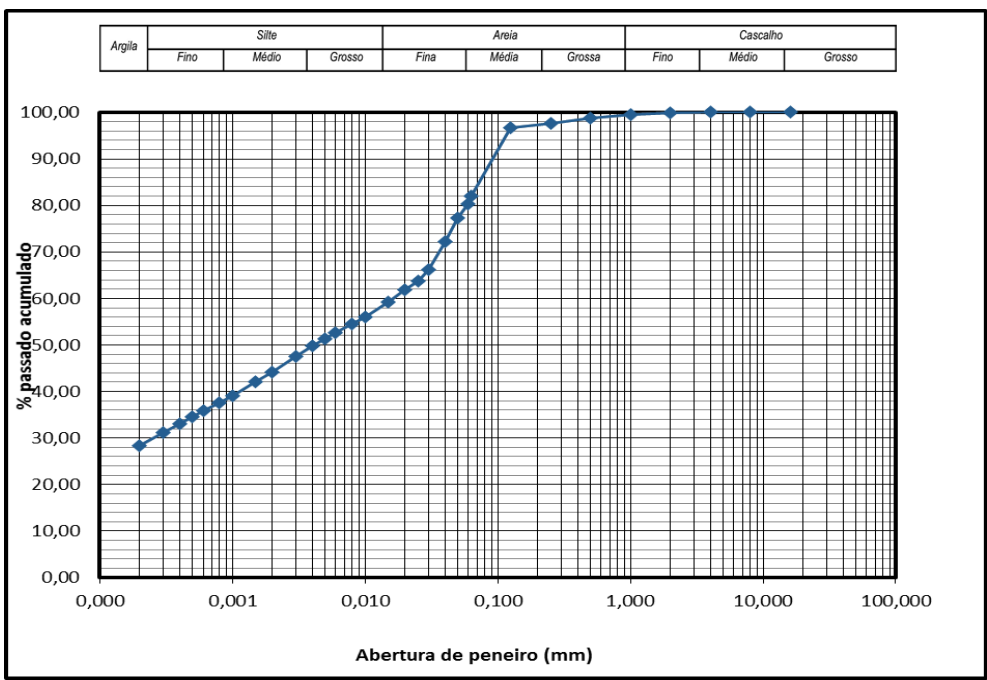
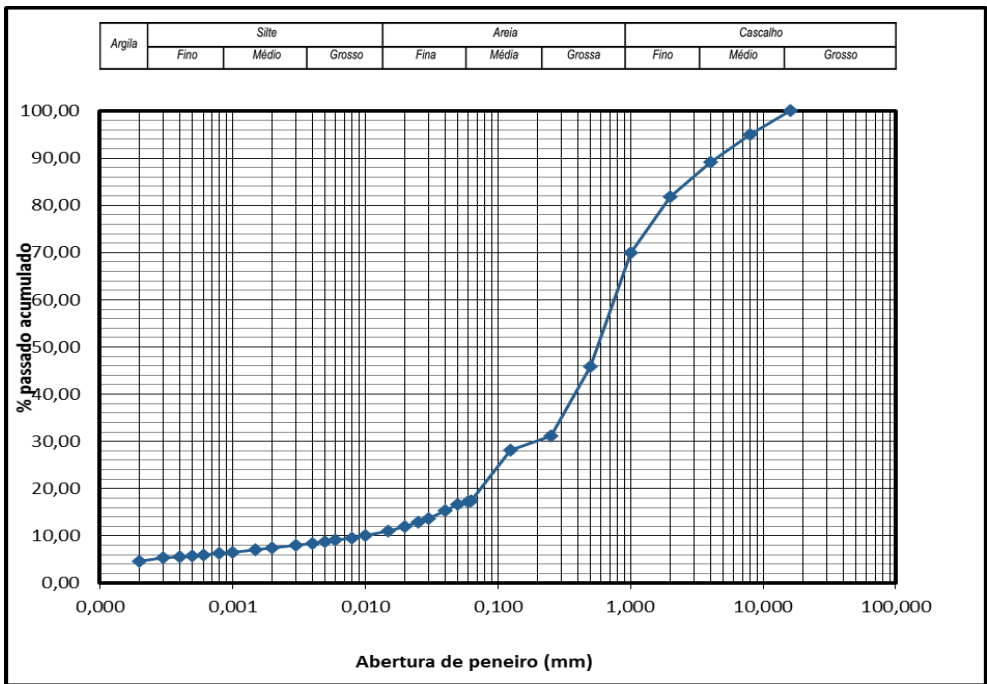
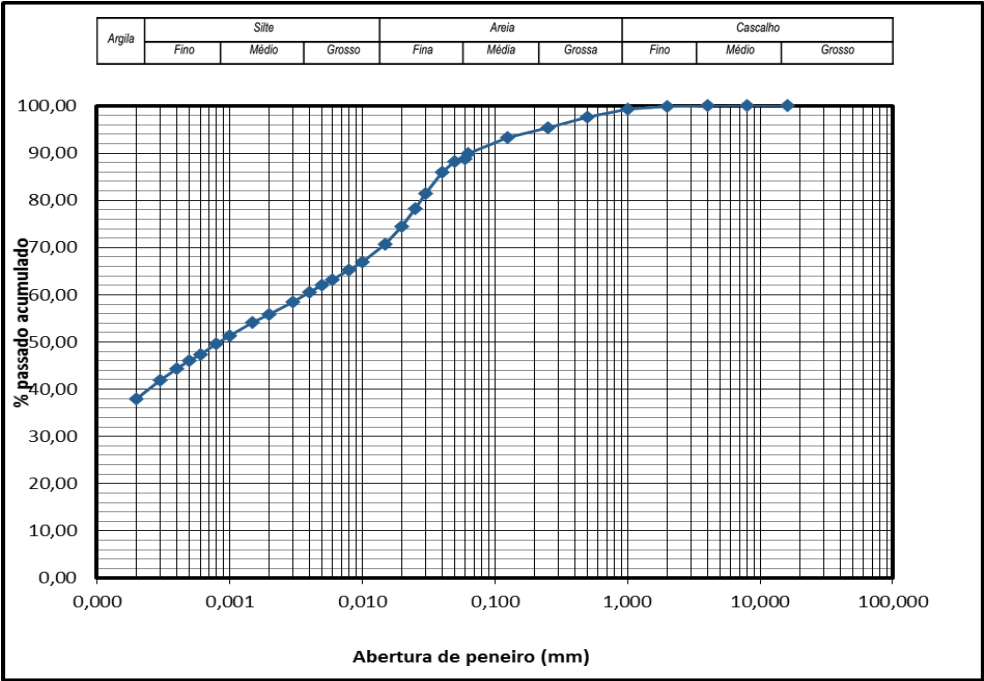


Gráfico 60. Distribuição granulométrica da amostra dos 126 aos 132 metros.

ANEXO 3





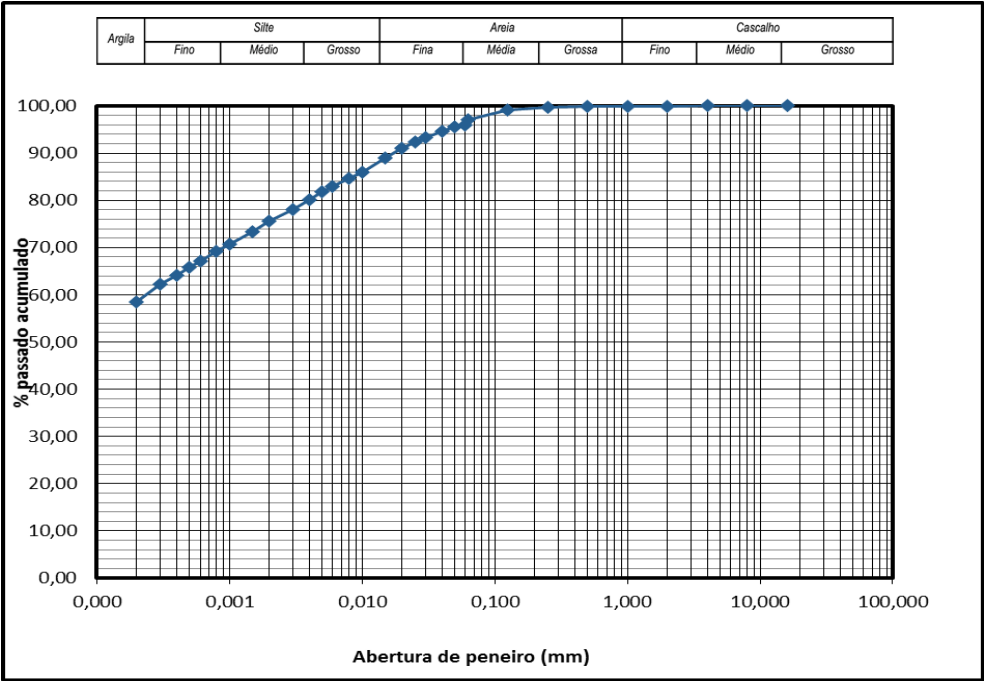


Gráfico 65. Distribuição granulométrica da amostra dos 24 aos 30 metros.

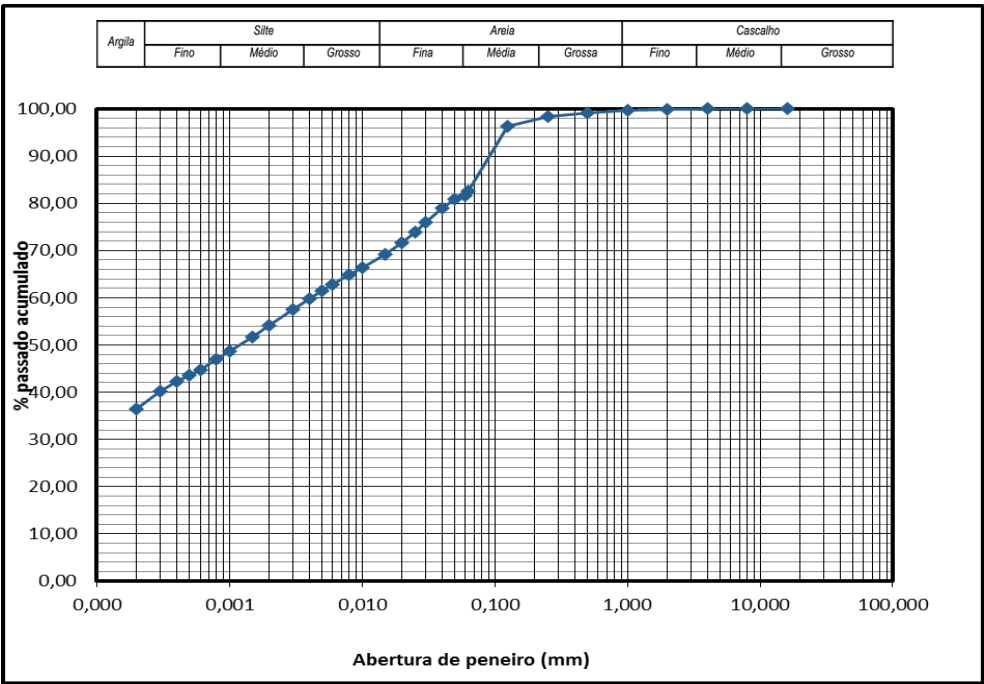


Gráfico 66. Distribuição granulométrica da amostra dos 30 aos 36 metros.

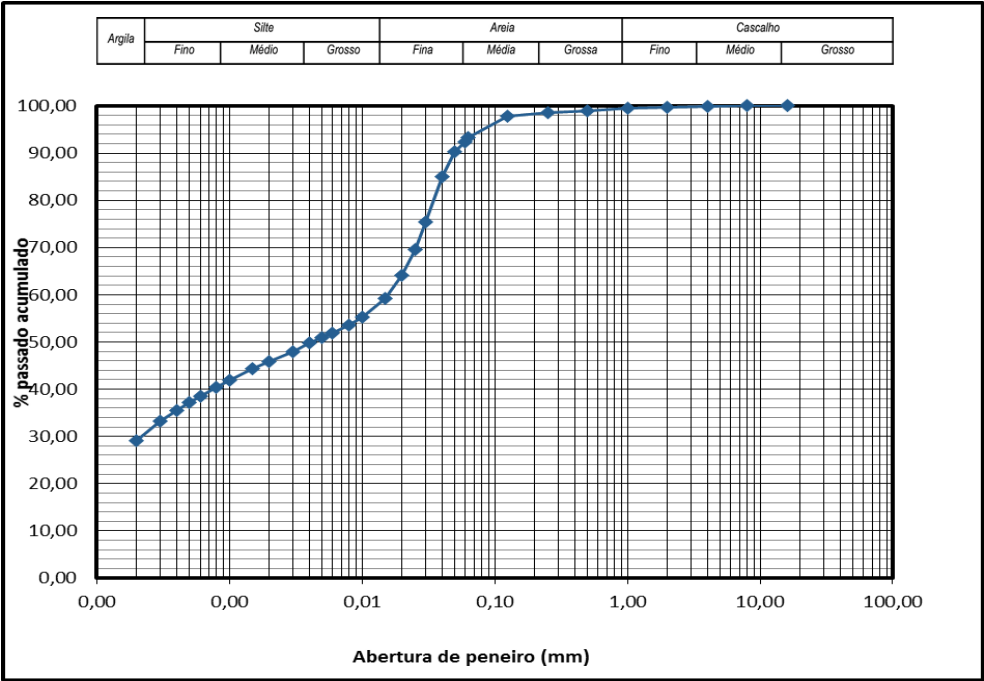


Gráfico 67. Distribuição granulométrica da amostra dos 36 aos 42 metros.

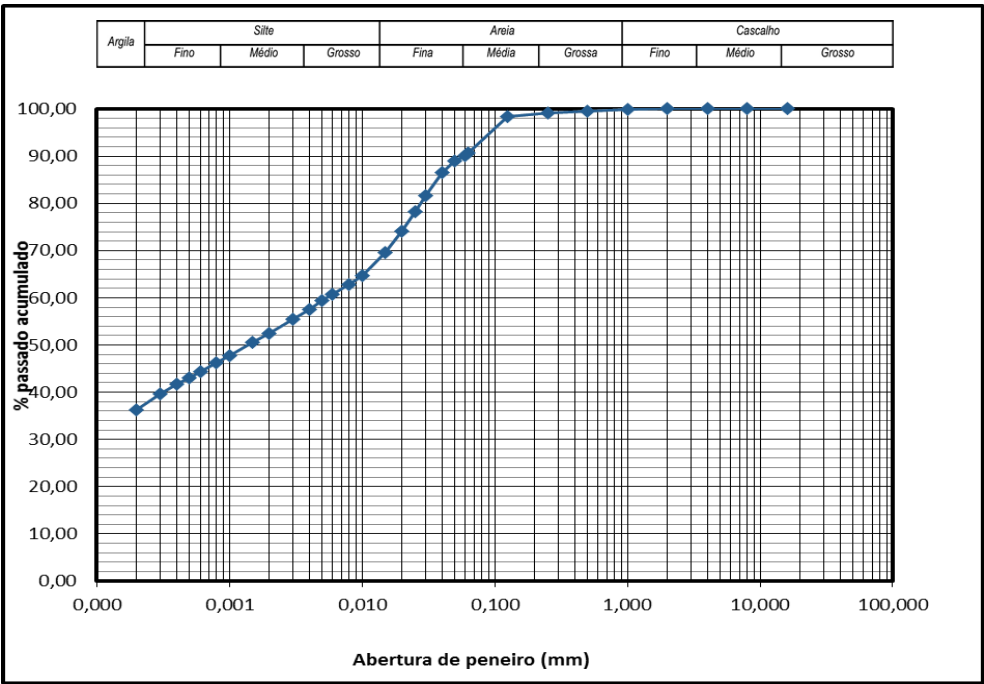


Gráfico 68. Distribuição granulométrica da amostra dos 42 aos 48 metros.

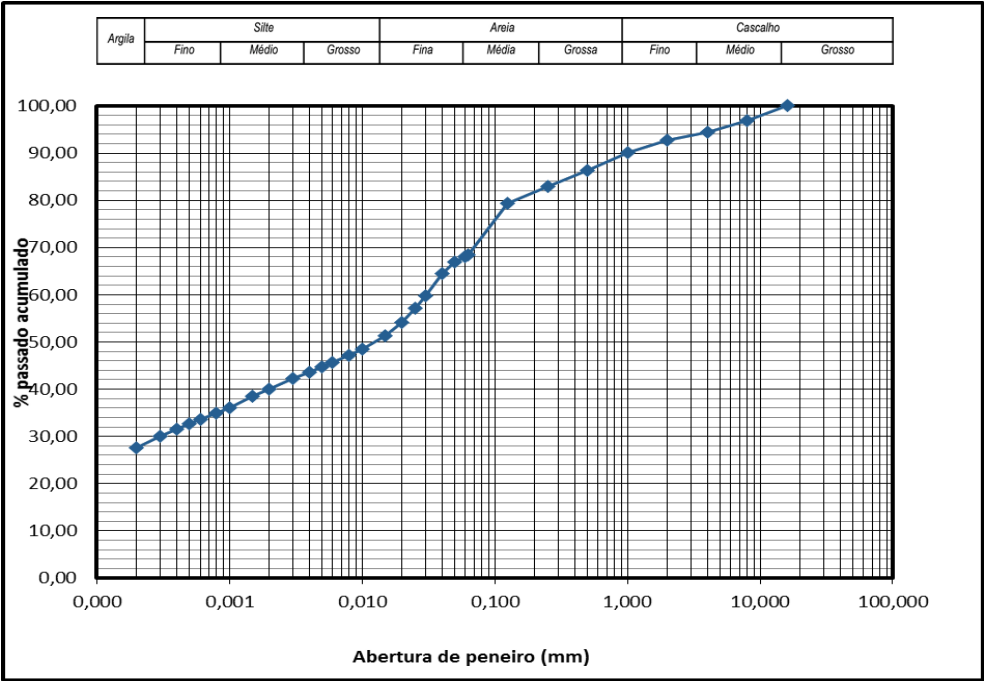


Gráfico 69. Distribuição granulométrica da amostra dos 48 aos 54 metros.

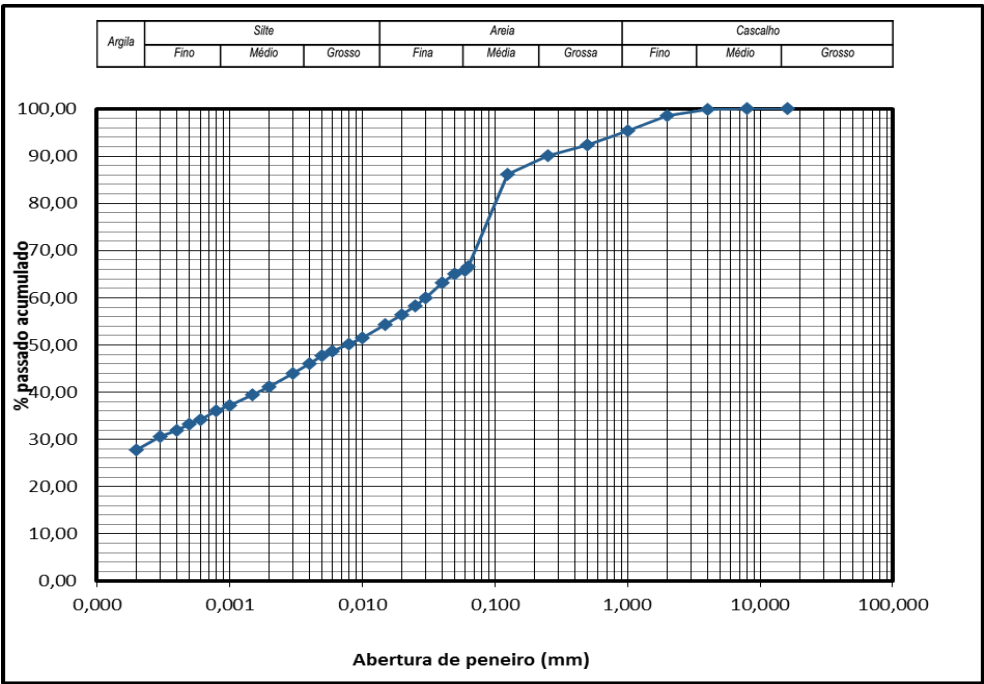


Gráfico 70. Distribuição granulométrica da amostra dos 54 aos 60 metros.

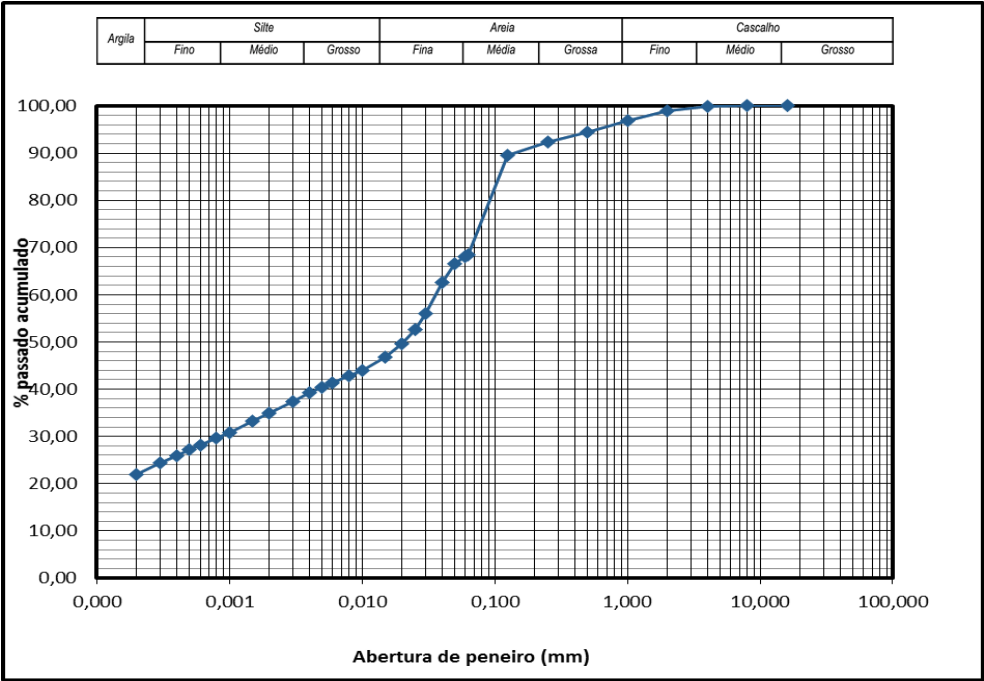


Gráfico 71. Distribuição granulométrica da amostra dos 60 aos 66 metros.

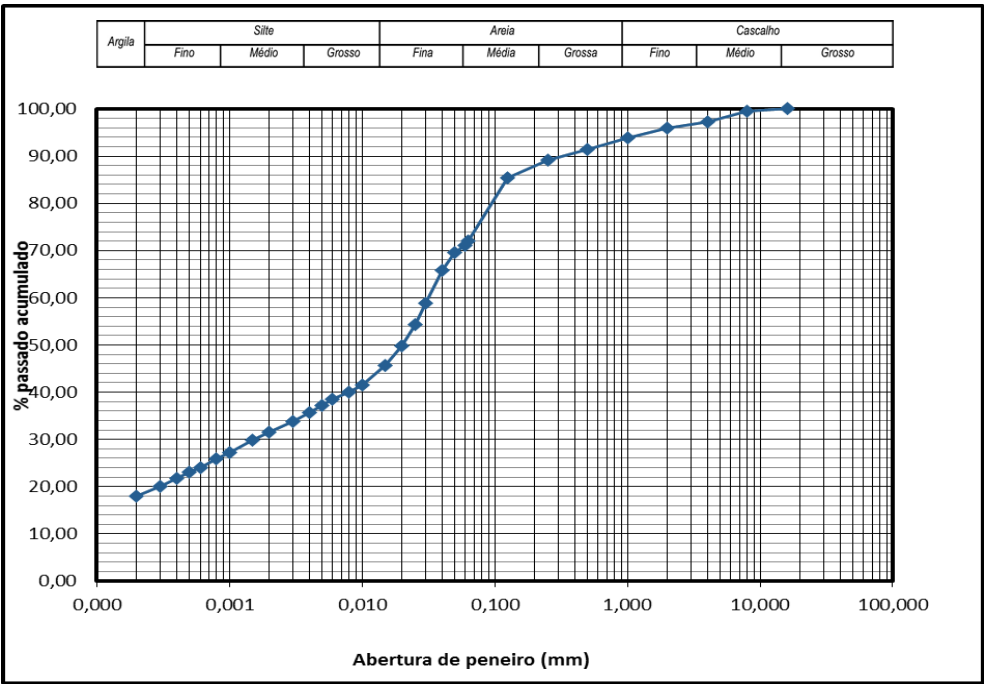


Gráfico 72. Distribuição granulométrica da amostra dos 66 aos 72 metros.

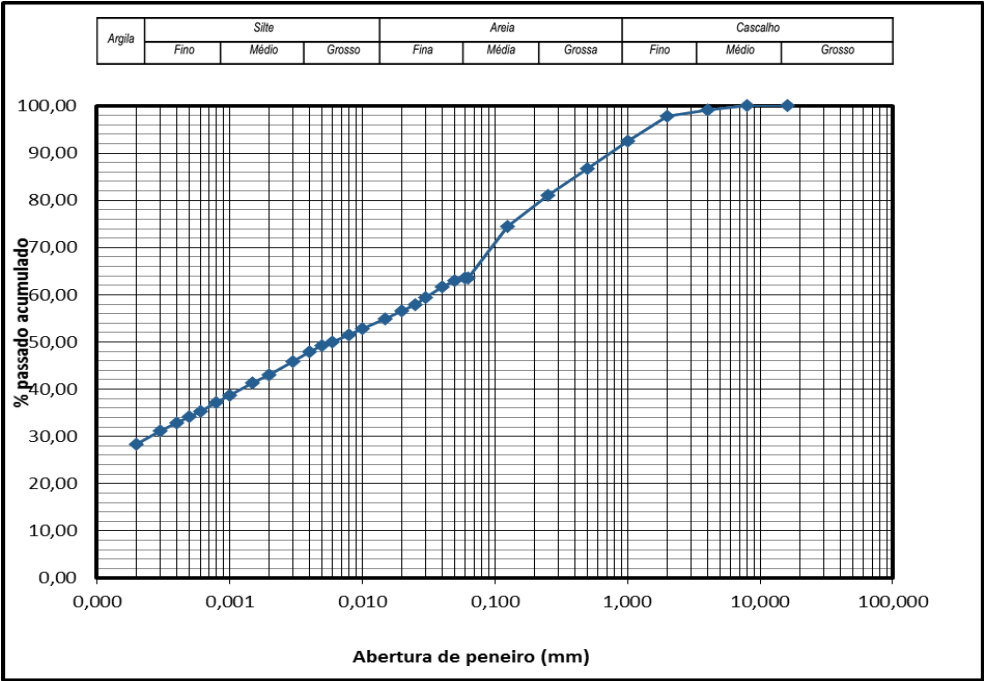


Gráfico 73. Distribuição granulométrica da amostra dos 72 aos 78 metros.

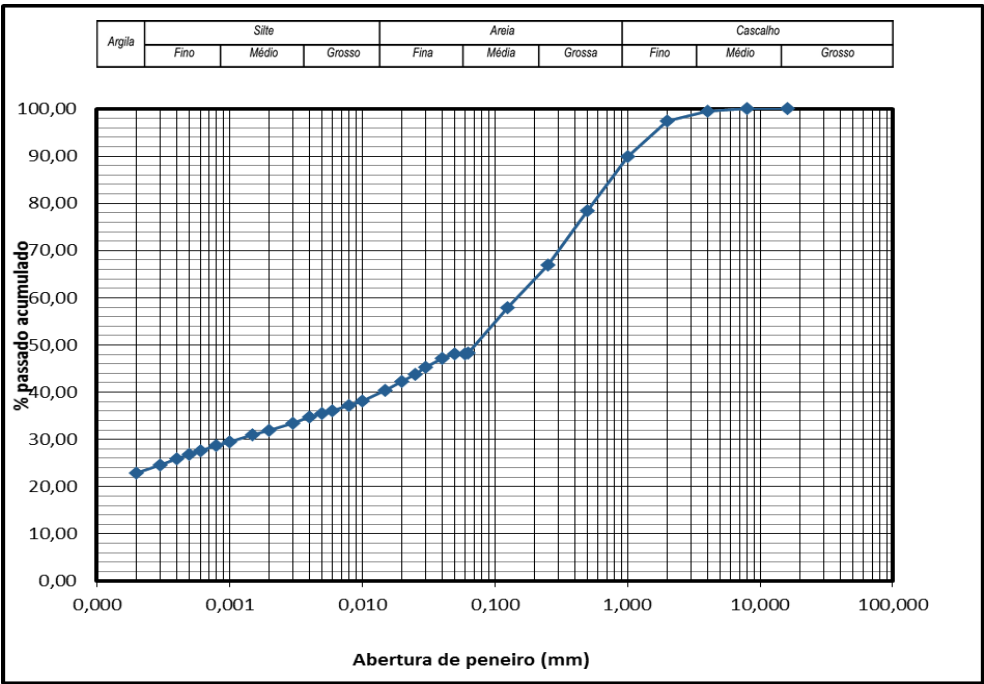


Gráfico 74. Distribuição granulométrica da amostra dos 78 aos 84 metros.

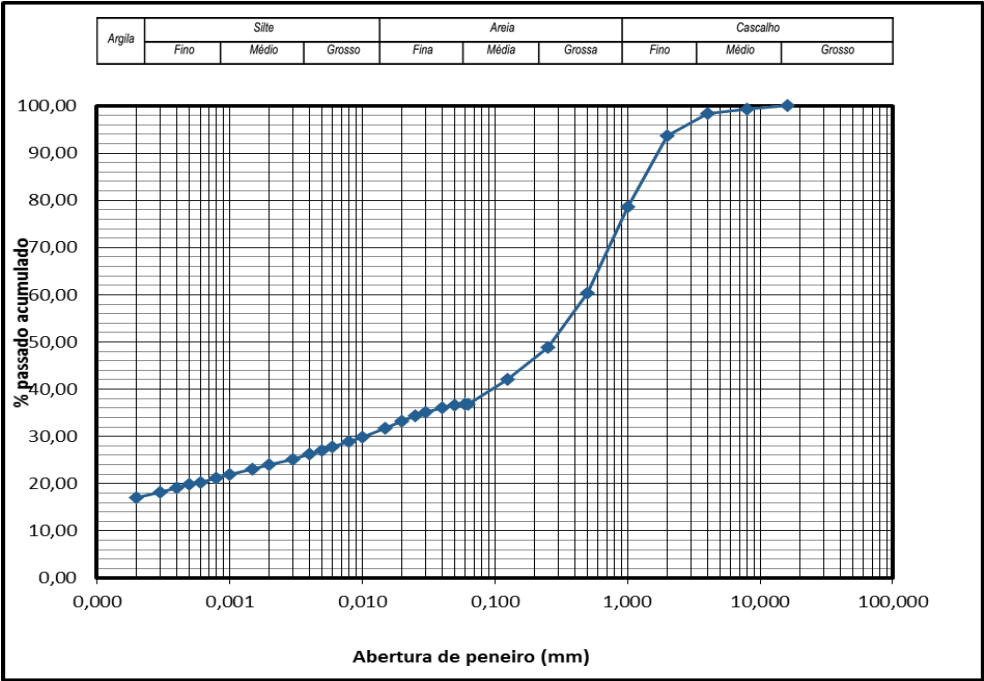


Gráfico 75. Distribuição granulométrica da amostra dos 84 aos 90 metros.

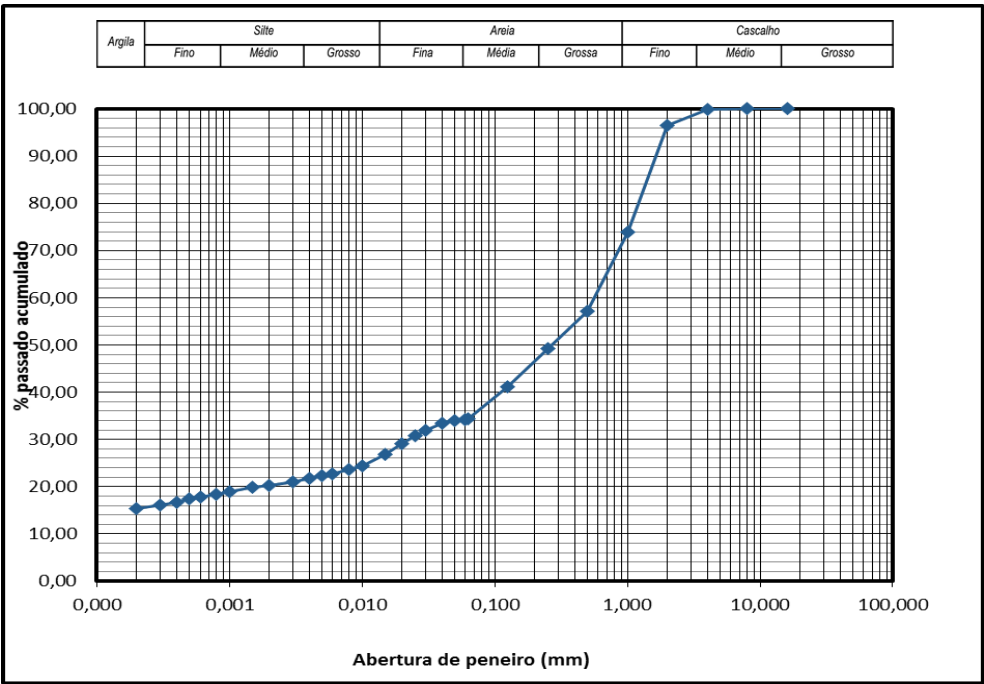


Gráfico 76. Distribuição granulométrica da amostra dos 90 aos 96 metros.

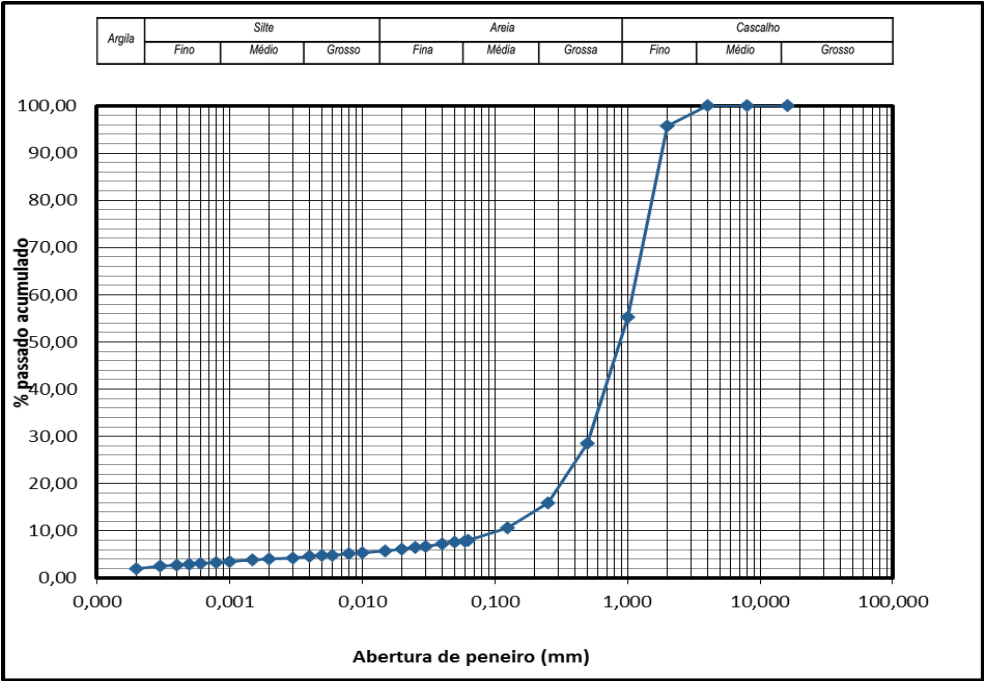


Gráfico 77. Distribuição granulométrica da amostra dos 102 aos 108 metros.

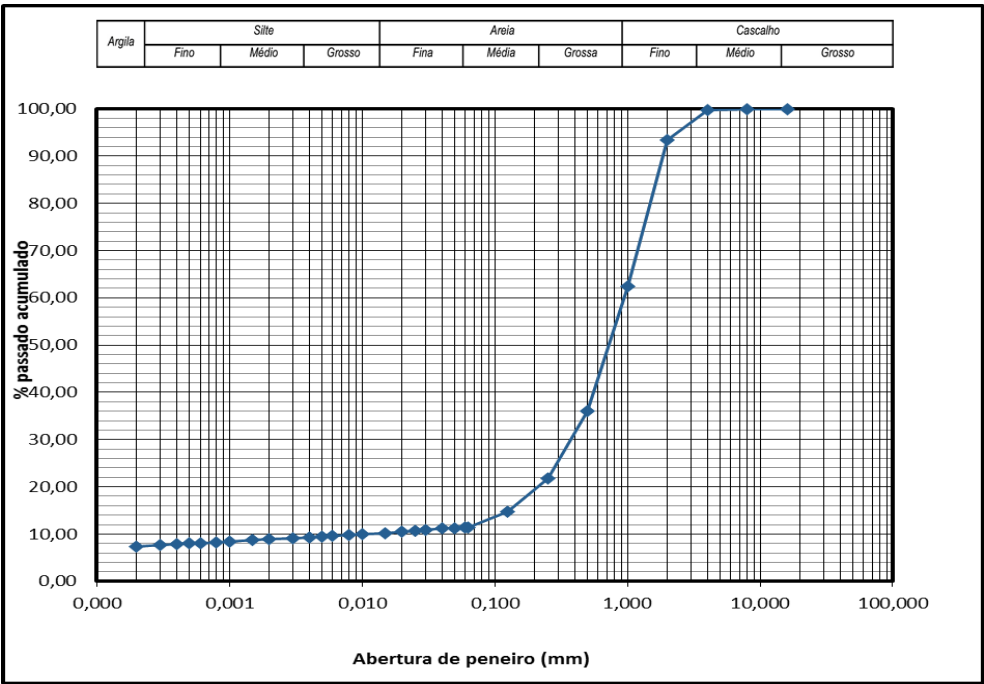


Gráfico 78. Distribuição granulométrica da amostra dos 108 aos 114 metros.

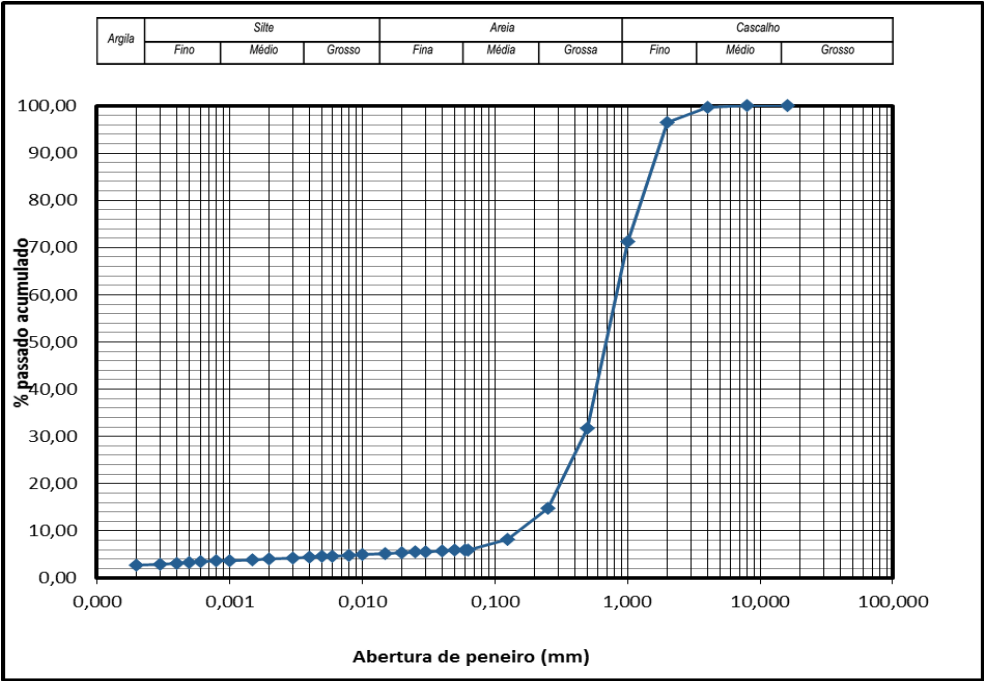


Gráfico 79. Distribuição granulométrica da amostra dos 114 aos 120 metros.

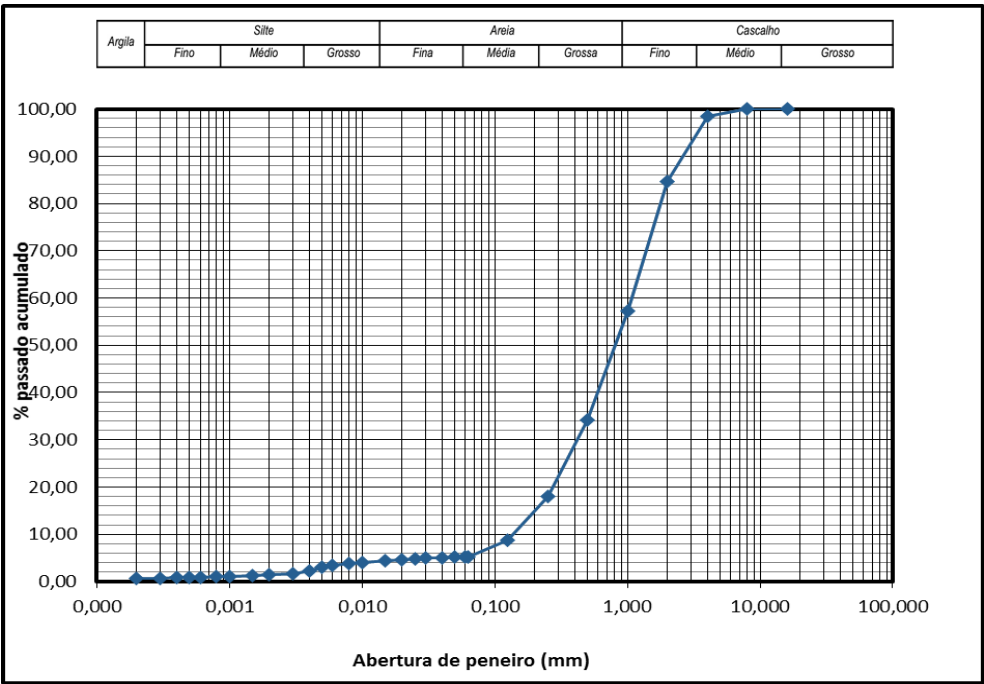


Gráfico 80. Distribuição granulométrica da amostra dos 120 aos 126 metros.

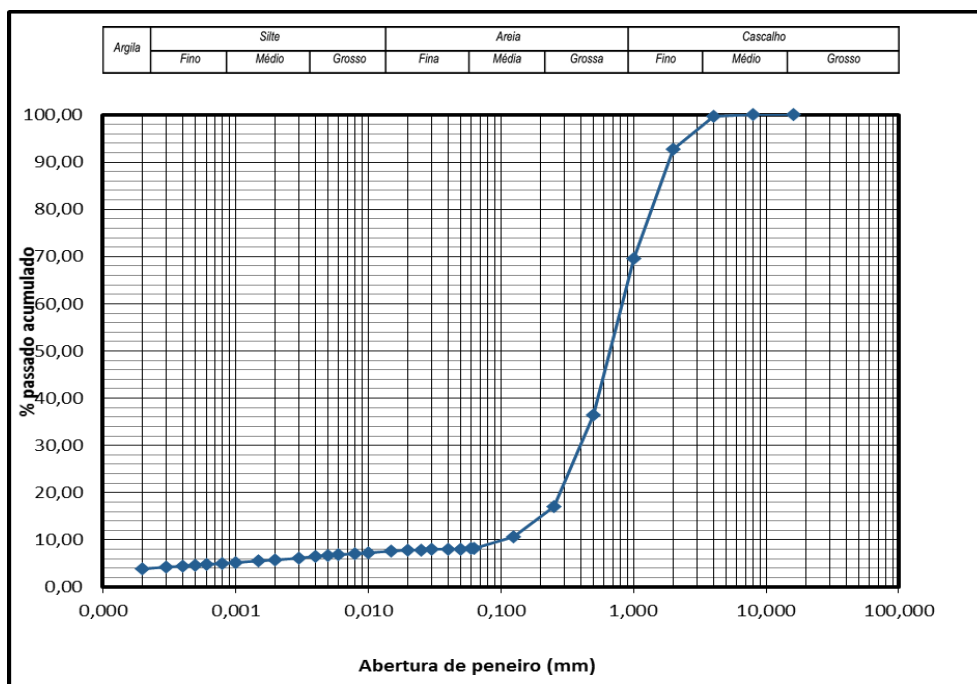


Gráfico 81. Distribuição granulométrica da amostra dos 126 aos 132 metros.